



Уральский
федеральный
университет

имени первого Президента
России Б.Н. Ельцина

Институт радиоэлектроники
и информационных
технологий

В. М. АНТИМИРОВ

ПРОЕКТИРОВАНИЕ АППАРАТУРЫ СИСТЕМ АВТОМАТИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ ДЛЯ РАБОТЫ В ЭКСТРЕМАЛЬНЫХ УСЛОВИЯХ

Часть 1

СОЗДАНИЕ САУ

Учебное пособие



Министерство образования и науки Российской Федерации

Уральский федеральный университет
имени первого Президента России Б. Н. Ельцина

В. М. Антимиров

**ПРОЕКТИРОВАНИЕ АППАРАТУРЫ
СИСТЕМ АВТОМАТИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ
ДЛЯ РАБОТЫ В ЭКСТРЕМАЛЬНЫХ УСЛОВИЯХ**

Часть 1

СОЗДАНИЕ САУ

Учебное пособие

Рекомендовано методическим советом УрФУ
для студентов, обучающихся по программе магистратуры
по направлению подготовки 220400 — Управление
в технических системах

Екатеринбург
Издательство Уральского университета
2015

УДК 681.51(042.4)

ББК 3-5-05

A72

Рецензенты: д-р техн. наук, проф. кафедры «Электрические машины» УрГУПС *Б. С. Сергеев*; канд. техн. наук, зам. ГД по РКТ АО «НПО автоматики» *Л. Н. Бельский*

Научный редактор — зам. зав. кафедрой *В. В. Телицин*

Иллюстрации на обложке предоставлены пресс-службой «НПО автоматики»

Антимиров, В. М.

A72 Проектирование аппаратуры систем автоматического управления : учебное пособие : в 2 ч. Ч. 1 : Создание САУ / В. М. Антимиров. — Екатеринбург : Изд-во Урал. ун-та, 2015. — 92 с.

ISBN 978-5-7996-1554-3 (ч. 1)

ISBN 978-5-7996-1553-6

В первой части учебного пособия приводятся основные понятия автоматизированных систем управления (АСУ), работающих с участием человека-оператора, и систем автоматического управления (САУ), работающих полностью в автономном режиме в экстремальных условиях.

Рассмотрены отличия и общие признаки АСУ и САУ, приведена классификация САУ и сформулированы основные принципы обеспечения и повышения их надежности. Приведена функция технической эффективности для оценки качества таких систем, а также рассмотрены основные принципы повышения их производительности.

Пособие может быть полезно студентам электротехнических специальностей, преподавателям технических вузов, а также специалистам научно-исследовательских и проектных институтов.

Библиогр.: 17 назв. Табл. 5. Рис. 29.

УДК 681.51(042.4)

ББК 3-5-05

ISBN 978-5-7996-1554-3 (ч. 1)

ISBN 978-5-7996-1553-6

© Уральский федеральный университет, 2015

Введение

В последнее время результаты космических исследований все шире проникают в различные виды человеческой деятельности: связь, метеорология, защита окружающей среды, сельское хозяйство, специальные производственные процессы, например получение новых материалов, и др. [1].

Ракетно-космическая техника (РКТ) непрерывно развивается, реализуются все более глобальные программы исследований, и, как следствие этого, совершенствуется управление космическими аппаратами (КА).

Управление представляет комплекс взаимосвязанных действий, направленных на достижение цели полета с максимальной возможной эффективностью, безопасностью и надежностью. Управление КА осуществляется, как правило, посредством бортовых систем автоматического управления (БСАУ), экипажем КА или наземными космическими комплексами и персоналом, обслуживающими полет.

1. Классификация САУ и УВК

В настоящее время в управлении производственными предприятиями широко используются автоматизированные системы управления (АСУ), которые подразумевают автоматизацию и компьютеризацию сбора и обработки данных о деятельности предприятия и, как правило, включают в свой состав человека-оператора или лицо, принимающее решения (ЛПР).

Основной задачей технических средств АСУ является освобождение человека-управленца от рутинной работы по сбору информации о состоянии объекта управления и его компонентов, а также освобождение от механических действий на изменение состояния исполнительных механизмов, т. е. на начальном и конечном этапах цикла управления.

Широкое распространение получили автоматизированные системы управления технологическими процессами (АСУ ТП), служащие для оперативного управления техническими установками в промышленности и обеспечивающие снижение трудоемкости производства и качества изготавливаемой продукции.

Наряду с АСУ для управления техническими средствами, например изделиями РКТ, используются автоматические системы управления (фактически роботы). Чтобы не путать автоматизированные системы управления (АСУ) и автоматические системы управления, последние будем называть системами автоматического управления (САУ).

Создание САУ предполагает, что все решения заложены заранее в алгоритмах функционирования, которые реализуются в программах вычислительных средств, входящих в состав САУ. В результате в процессе работы решения принимаются аппаратурой автоматически, без вмешательства человека.

Все системы — и АСУ, и САУ — имеют близкую структуру в части аппаратурного обеспечения и включают в свой состав подсистемы:

- сенсорные, т. е. датчики, дающие информацию о состоянии процесса (температуре, концентрации и т. д.);
- центральную интеллектуальную часть, как правило, включающую в свой состав ЭВМ, ведущую обработку цифровой информации;
- исполнительные механизмы (исполнительные органы (ИО), изменяющие положение регуляторов, влияющих на процесс).

Обобщающая структурная схема АСУ приведена на рис. 1.1.

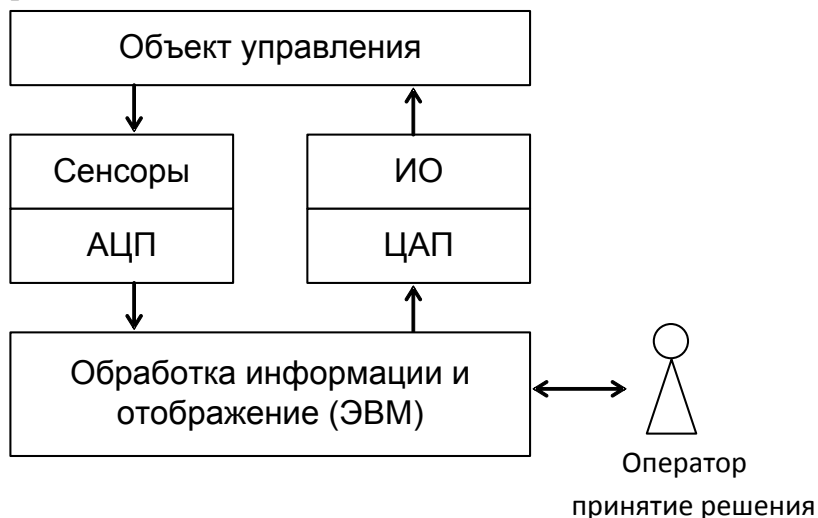


Рис. 1.1. Обобщенная структура АСУ

Для ввода данных в ЭВМ между ЭВМ и сенсорами (датчиками), дающими информацию в аналоговом виде (ток, напряжение, частота), вводят аналогово-цифровые преобразователи

(АЦП), а между ЭВМ и ИО вводят цифро-аналоговые преобразователи (ЦАП).

В АСУ предполагается, что оператор работает с ЭВМ и получает информацию в обработанном и систематизированном виде, что, по сути, и является основной задачей автоматизации. На основе этой информации через вызов необходимых программ оператор вводит указания (уставки) в ЭВМ, которая выдает соответствующие команды и воздействия через ЦАП на ИО.

В структуре САУ можно выделить центральное звено — вычислительные средства совместно с АЦП и ЦАП. В среде разработчиков САУ принято объединять эти средства в самостоятельную подсистему — управляющий вычислительный комплекс (УВК), для бортовых применений изделий ракетно-космической техники (РКТ) его называют БУВК.

Все системы (АСУ и САУ) можно разделить на 2 вида: стационарные и мобильные. Классификация систем управления (СУ) по применению приведена на рис. 1.2.

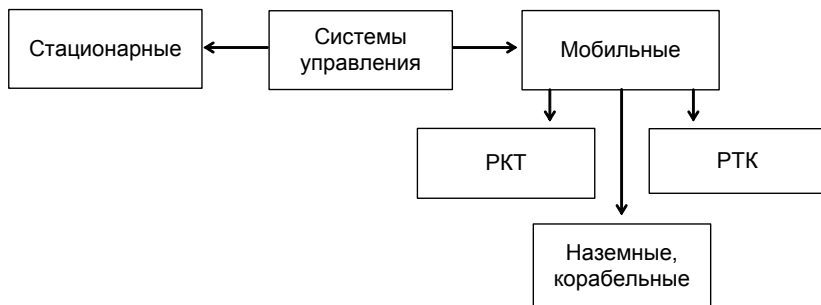


Рис. 1.2. Классификация СУ по применению

Системы управления стационарными объектами — это, как правило, АСУ (АСУ производством или отдельными механизмами, например станками с числовым программным управлением (ЧПУ)).

Системы управления подвижными объектами (мобильные СУ). Объектами могут быть робототехнические комплексы (РТК), в том числе с дистанционным управлением, в которых информация от АЦП или видеоизображение передается через радиотракт. В качестве примера можно привести РТК «СУРА», который был создан для ликвидации последствий Чернобыльской аварии на базе тяжелого трактора Т-500 Чебоксарского завода промышленных тракторов (ЧЗПТ), и САУ разработки ФГУП «НПО автоматизации» [2].

В САУ подвижными объектами, как правило, входят две ЭВМ, одна из которых (бортовая) устанавливается на «объекте», собирает, «уплотняет» информацию от АЦП или видеокамер и направляет в канал связи. После приема команды от оператора по радиоканалу бортовая ЭВМ передает управление через ЦАП на исполнительные органы мобильного средства или механизмы манипуляторов робота с учетом их фактического положения по информации установленных в них датчиков обратной связи, например бульдозерной лопаты. Вторая управляющая ЭВМ — ЭВМ общего назначения (ЭВМ ОН) — располагается вне объекта, но может быть размещена на своем мобильном средстве, например на автомобиле повышенной проходимости УРАЛ 365, с частично герметичным кузовом (кузов условно герметичный (КУНГ)), на его шасси, и «обслуживает» оператора. В таких кузовах размещают аппаратуру наземной части систем управления ракет носителей при работе на технических позициях полигонов. Обобщенная структурная схема АСУ автоматизированной системы дистанционного управления (АСДУ) приведена на рис. 1.3. При создании АСДУ необходимо решать сложную задачу, связанную с внесением задержек в управление из-за запаздывания в каналах передачи данных по радио-линии.

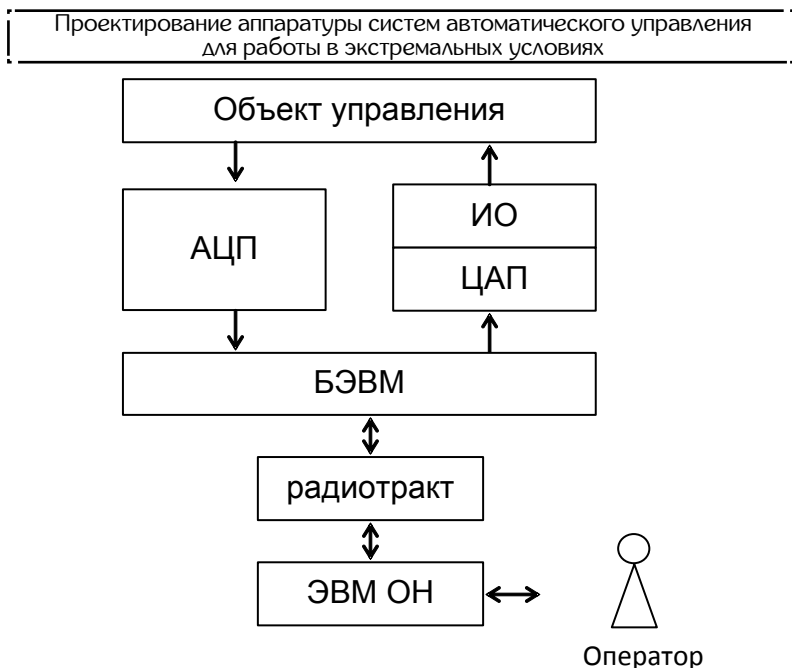


Рис. 1.3. Обобщенная структура АСДУ

Отдельный класс составляют полностью автоматические системы — системы автоматического управления (САУ), где все решения по управлению принимаются в бортовой ЭВМ — примером такого объекта может быть бытовой робот или робот-разведчик (например, луноход или разведчик химически зараженной или радиоактивной местности при техногенных катастрофах на производствах химической, нефтегазовой или атомной промышленности). Причем для роботов при ликвидации последствий аварий на объектах атомной промышленности должна решаться задача обеспечения их радиационной стойкости.

Большой самостоятельный класс составляют САУ объектами ракетно-космической техники, как собственно ракетами, так и космическими аппаратами. В этих системах можно выделить два направления: системы гражданского (коммерческо-

го) применения, а также САУ РКТ, создаваемые в интересах оборонного комплекса. Примером последних являются САУ для изделий, стартующих со средств морского базирования, в частности с подводных лодок (ПЛ) [2], роль которых видна из табл. 1.1.

Таблица 1.1

Триада стратегических вооружений

Межконтинентальные баллистические ракеты наземного базирования		Морские стратегические ядерные силы		Стратегическая авиация	
США	Россия	США	Россия	США	Россия
14,3 %	28,6 %	50 %	50 %	35,7 %	21,4 %

Реализация САУ зависит от условий эксплуатации, которые связаны с объектом управления и внешними воздействующими факторами, параметры которых приведены в табл. 1.2.

Таблица 1.2

Условия эксплуатации, связанные с внешними воздействующими факторами

Параметр	Условия эксплуатации	
	Нормальные	Экстремальные
Температура окружающей среды, °С	от +15 до +25	от –40 до +50
Механические воздействия: 1. Линейные перегрузки, g 2. Вибрация: – амплитуда, g – частота, Гц 3. Удары: – амплитуда, g – длительность, мс	единицы 0,1 от 10 до 100 отсутствуют	до 150 более 0,5 от 1 до 100 (ШСВ) 10...15 1...5

Окончание табл. 1.2

Параметр	Условия эксплуатации	
	Нормальные	Экстремальные
Ионизирующее излучение:		
1. Фоновое излучение (характерно для бытовых условий, особенно в горной местности):		
— мощность дозы, Р/с	до 10^{12}	$10^{12} \dots 10^{13}$
— доза, Р	30	$10^5 \dots 10^6$
2. Импульсное излучение ЯВ:	отсутствует	
— мощность дозы, Р/с		$5 \times 10^5 \dots 5 \times 10^6$
— доза, Р		$10^6 \dots 10^7$
— флюенс нейтронов, $n^\circ/\text{см}^2$		до 10^{14}

Перечень вопросов для самоконтроля

1. В чем основное отличие САУ и АСУ?
2. Какая новая подсистема вводится в АСУ с дистанционным управлением?
3. Какие задачи в АСДУ решают бортовые вычислительные средства и ЭВМ поста управления?
4. Каков диапазон температур окружающей среды при работе в нормальных условиях?
5. Работает ли бытовая аппаратура и механизмы (телевизоры, пылесосы) в радиационных полях, и если работают, то чем эти поля вызваны?
6. Приведите пример применения робототехнического комплекса для ликвидации последствий аварий.
7. По какой структуре целесообразно создавать системы управления робототехническими комплексами (как САУ или как АСУ)?
8. Каковы, по Вашему мнению, основные сложности дистанционного управления роботами, и в частности луноходом

или роботом для ликвидации аварий с радиоактивным заражением местности?

9. Каким механическим воздействиям могут подвергаться САУ?

10. Какими средствами снижается уровень воздействия вибраций на аппаратуру?

11. Возможно ли применять амортизаторы для снижения уровня вибраций на аппаратуре подсистем инерциальной навигации, и в частности гироскопических приборов?

2. Задачи, решаемые при проектировании САУ

В соответствии с ГОСТ Р15.201–2000 (СРПП. Продукция производственно-технического назначения. Порядок разработки и постановки на производство) при создании САУ можно выделить следующие основные этапы.

1 этап: Разработка технического задания

На этом этапе на основе технических требований и тактико-технического задания головного заказчика (потребителя) формируются основные требования к облику САУ, ее составу, условиям эксплуатации, требования по функциональному набору решаемых задач, задается облик (параметры) объекта управления. На данном этапе ведутся научно-исследовательские работы по оценке:

- возможности создания системы с требуемыми характеристиками;
- возможности изготовления аппаратуры подсистем САУ и их компонентов в условиях серийного отечественного производства.

На этапе подготовки ТЗ с целью обоснования требований проводятся работы:

- моделирование работы отдельных подсистем и САУ в целом с целью подтверждения возможности выполнения требуемых алгоритмов управления;
- макетирование отдельных компонентов и подсистем;
- для БУВК проводится оценочное программирование, подтверждающее реализуемость необходимых алгоритмов

управления, проводится оценка точности работы контура управления с учетом погрешностей датчиков ИО, АЦП, ЦАП, точности цифровых вычислений;

— выполняются патентные исследования с целью оценки уровня закладываемых требований по САУ в целом.

2 этап: Предварительное проектирование (технические предложения)

На этом этапе проводятся следующие работы:

— оценка выполнимости задаваемых в ТЗ требований;

— моделирование и отработка работы подсистем и САУ в целом;

— предварительное формирование основных алгоритмов, предлагаемых для реализации в БУВК;

— формирование структуры и принципов приборной реализации подсистем, макетирование узлов подсистем и отработка заданных алгоритмов функционирования с использованием макетных образцов подсистем и математических моделей работы объекта управления;

— формирование основных направлений приборной реализации подсистем, определение состава кооперации предприятий, участвующих в создании САУ.

Этап завершается выпуском технического отчета о научно-исследовательской работе (НИР).

3 этап: Разработка эскизного проекта (ЭП)

Это важнейший этап создания САУ, так как на начальном этапе работ определяется облик системы и основные закладываемые решения и, по сути, это фундамент для дальнейших работ. При перекосах в этом фундаменте все здание, построенное в дальнейшем, будет с перекосами.

Данный этап предусматривает следующие работы:

— выпуск эскизной конструкторской документации (ЭКД);

— выбор основных комплектующих изделий (так называе-

мых «покупных» комплектующих изделий (ПКИ)) и подготовка договоров на их поставку;

- апробация ПКИ, в том числе с изготовлением опытных макетных образцов приборов подсистем и САУ в целом;
- выпуск заключения о гарантированном обеспечении ПКИ, заключение предварительных контрактов с предприятиями ВПК по кооперации на изготовление ПКИ.

Итогом работ этапа ЭП является выбор и обоснование основного и возможных дополнительных вариантов приборной реализации. Проводится защита материалов ЭП в головной организации.

Решения, утвержденные по результатам защиты ЭП, являются обязательными для дальнейшей реализации. Этап завершается выпуском эскизного проекта и его защитой в головной организации заказчика.

4 этап: Техническое проектирование (ТП)

На данном этапе осуществляется:

- разработка схемной и конструкторской документации, изготовление экспериментальных образцов приборов;
- математическая формулировка рабочих алгоритмов функционирования САУ и их отработка на моделирующих стендах с использованием экспериментальных образцов приборов;
- выпуск заключения по результатам отработки о правильности разработки алгоритмов и программного обеспечения (ПО).

В части аппаратурной реализации на этапе ТП проводится технологическая и электротехническая подготовка производства.

Первые экспериментальные образцы приборов проходят автономные лабораторные отработочные испытания (этап ЛОИа), по результатам которых при необходимости дорабатывается конструкторская документация (КД).

На основе доработанной КД изготавливается дополнительный комплект аппаратуры, с которым производятся автоном-

ные отработочные испытания, совместно с представителями заказчика (этап СОИа). После успешного завершения ЛОИа и СОИа проводятся этапы комплексных отработочных испытаний — лабораторные (ЛОИк) и совместные (СОИк).

При успешном завершении этапов обработки проводится запуск в производство головной партии аппаратуры по действующей конструкторской и технологической документации. Изготовленная аппаратура повторно проходит все этапы испытаний — ЛОИа, СОИа, ЛОИк, СОИк. При успешном завершении испытаний выпускается заключение о готовности производства к серийному изготовлению аппаратуры и к проведению натурных испытаний (НИ) с объектом управления.

Проводится изготовление первой поставочной партии аппаратуры для НИ. На этом этапе конструкторской документации присваивается литера «О», что соответствует этапу опытного производства.

При положительных результатах НИ актом Государственной комиссии (ГК) подтверждается соответствие САУ заданным требованиям. На основе акта ГК выпускается Постановление Правительства РФ о переходе к этапу серийного изготовления аппаратуры соответствующего изделия и его САУ.

5 этап: Серийное производство

На этом этапе формируется система обеспечения качества изготавливаемой аппаратуры, выполняется комплекс мероприятий [2] в соответствии с ГОСТ Р 15.201–2000.

На всех предприятиях-изготовителях компонентов радиоэлектронной аппаратуры (РЭА) разрабатывается комплекс мероприятий по обеспечению качества. Примером может быть стандарт, выпущенный в ФГУП «НПО автоматики» СТП 551.21.001–2001 (Система качества. Экспериментальная отработка системы управления ракетных и космических комплексов. Основные положения).

Для подтверждения уровня качества РЭА, изготавливаемой в серийном производстве, проводят периодические испытания, объем которых согласовывается с заказчиком. Эти испытания проводятся, как правило, при изменении техпроцессов или с периодичностью, согласованной с заказчиком (примерно 1 раз в год).

Периодичность и объем этих испытаний устанавливается в технических условиях (ТУ) на прибор. Испытания в объеме периодических проводятся также в случае изменения технических параметров (норм), записанных в согласованных ТУ на прибор.

Перечень вопросов для самоконтроля

1. Какие основные этапы предусмотрены при проектировании САУ?
2. Каковы основные задачи этапа эскизного проекта?
3. Сколько вариантов реализации САУ может быть предложено на этапе эскизного проекта?
4. В каких случаях проводят периодические испытания?
5. Какие задачи отработки решаются при ЛОИа и ЛОИк?
6. На каком этапе проводится технологическая и электро-техническая подготовка производства?
7. Какой этап испытаний является завершающим перед переходом к серийному производству?
8. Возможно ли изменение технических решений после защиты эскизного проекта?
9. По результатам каких испытаний проводится доработка КД?
10. На каком этапе формулируются и отрабатываются алгоритмы управления САУ?
11. Как оформляются результаты работ этапа «Технические предложения»?
12. Чем завершается этап эскизного проектирования?

3. Структура САУ и архитектура БУВК

3.1. Структура САУ

Структуру определяет состав системы из подсистем и связи между ними, т. е. структура — это состав блоков (подсистем) и связей между ними без возможности изменения режимов работы. Пример структуры САУ представлен на рис. 3.1.

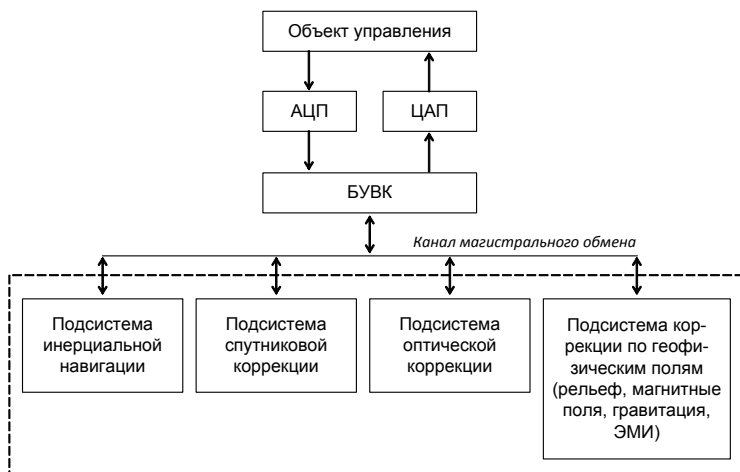


Рис. 3.1. Пример структуры САУ для изделий РКТ

3.2. Архитектура БУВК

Понятие архитектуры включает структуру и алгоритмы ее работы, т. е. архитектура — это описание, данное потребителю в пользование с возможностью изменения алгоритмов по определенным правилам.

Применительно к БУВК архитектура подразумевает состав блоков ЦАП-АЦП, каналов ввода/вывода (КВВ), процессоров, ЗУ, а также системы команд процессоров и режимы работы КВВ (в частности, алгоритмы работы в режиме прямого доступа в память (ПДП)).

В настоящее время можно выделить следующие виды управления, реализуемые вычислительными средствами:

- централизованное, когда все алгоритмы реализуются в центральной бортовой вычислительной системе (БЦВС), а периферийные подсистемы коррекции и ЦАП/АЦП не содержат собственных вычислителей;

- распределенное, когда вычислительные средства входят в другие подсистемы, например в состав ЦАП/АЦП вводятся средства предварительной обработки информации. Для АЦП это могут быть задачи фильтрации, для ЦАП — задачи самоконтроля работы и управление резервом, если он есть. Наиболее характерным для распределенных БУВК является введение вычислительных средств в состав периферийных подсистем. Например, вычислительные устройства (ВУ) в составе подсистемы инерциальной навигации, т. е. в гиростабилизированной платформе (ГСП) или бесплатформенной инерциальной навигационной системе (БИНС), дающих информацию в БЦВС через стандартизированные каналы магистрального обмена. Задачи, решаемые вычислителями ГСП или БИНС, как правило, сводятся к формированию пакета данных, содержащих информацию об угловом положении и движении центра масс объекта управления с учетом ошибок измерительных устройств этих подсистем.

Такое распределение вычислительных задач делает системы функционально законченными и позволяет проводить их модернизацию без переработки САУ в целом.

Наиболее целесообразно и эффективно введение самостоятельных ВУ в состав подсистем, уточняющих параметры движения объекта управления, — это подсистема спутниковой навигации, подсистема оптической коррекции и подсистема коррекции по геофизическим полям.

Примером унифицированного магистрального канала может быть мультимплексный канал последовательного обмена с фазоманипулированным кодированием (ГОСТ Р 52070—2003, аналог MIL STD-1533), достаточно эффективным по затратам оборудования на его реализацию, поскольку передача ведется последовательным кодом, но с ограниченной пропускной способностью.

Специализированные вычислительные устройства (СВУ), входящие в состав периферийных подсистем, принято называть спецвычислителями.

Пример структуры распределенного БУВК приведен на рис. 3.2.

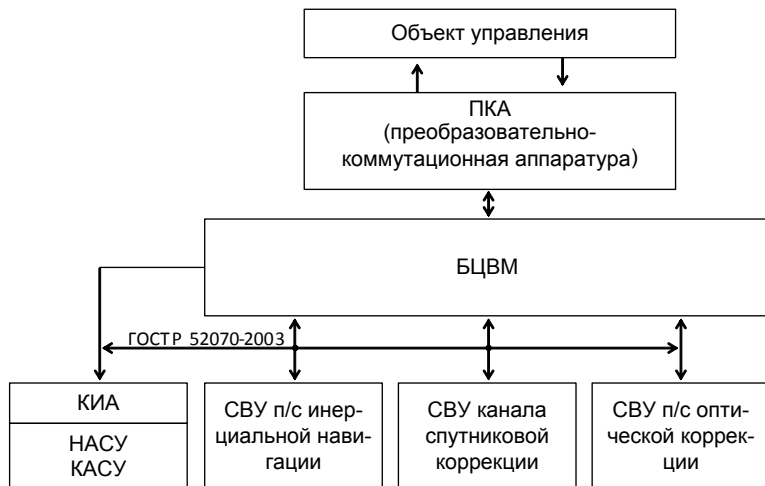


Рис. 3.2. Структура распределенного БУВК

Перечень вопросов для самоконтроля

1. В чем понятие архитектуры шире, чем понятие структуры?
2. Каковы задачи ПК?
3. В чем заключаются преимущества и недостатки распределенной архитектуры?

4. Каковы достоинства и недостатки канала магистрального мультиплексного обмена по ГОСТ Р52070–2003?
5. Для каких подсистем эффективно введение в них СВУ?
6. Чем НАСУ отличается от КАСУ?
7. Какие задачи решает СВУ подсистемы инерциальной навигации?
8. В чем основное отличие БЦВМ от ЭВМ ОН?
9. В какие подсистемы САУ, по Вашему мнению, целесообразно введение СВУ?
10. Какая структура СВУ канала оптической коррекции, по Вашему мнению, предпочтительна (многопроцессорная, по типу ЦДА или нейровычислительной сети)?

4. Состав и характеристика факторов, дестабилизирующих работу САУ

4.1. Основные дестабилизирующие факторы

Основные дестабилизирующие факторы, влияющие на сохранение свойств радиоэлектронной аппаратуры (РЭА) в порядке их весомости:

1. Время жизни, т. е. время, прошедшее с момента выпуска РЭА с завода-изготовителя, где она проходит большой объем приемо-сдаточных испытаний (ПСИ), которые гарантируют полное соответствие РЭА нормам технических условий (ТУ) на определенном последующем интервале времени, после которого для подтверждения соответствия нормам ТУ необходим цикл регламентных проверок (РП) с использованием контрольно-испытательной аппаратуры (КИА).

Несмотря на то, что РЭА не работает и хранится в складских условиях при определенной температуре и влажности, в ней идут следующие процессы:

- старение, при котором в соответствии с принципом термодинамики кристаллические структуры переходят в аморфные. Для полупроводников это означает изменение электрофизических свойств и соответственно параметров изготовленных на их основе электрорадиоизделий (ЭРИ);
- диффузия, например, дорожки в печатных платах могут замыкаться из-за роста «усов»;
- изменение свойства изоляционных материалов, которые могут стать в отдельных местах проводящими;
- окисление — возникновение оксидных изолирующих пленок на пайках и разъемных соединениях.

2. Температура окружающей среды и собственное тепло-выделение:

- во-первых, при хранении рост температуры ускоряет все процессы, описанные выше;
- во-вторых, в рабочем режиме изменение температуры сдвигает электрические характеристики РЭА.

С ростом температуры возрастает сопротивление проводников и полупроводников, т. е. изменяются режимы работы комплектующих ЭРИ. В ТУ на ЭРИ приведены характеристики параметров в диапазоне изменения температуры. РЭА должна быть рассчитана на изменение температуры внешней окружающей среды.

Например, при расширении диапазона температур от нормальных условий (25 ± 5) °С до интервала от минус 40 °С до плюс 50 °С относительная нестабильность кварцевых генераторов возрастает с величины 10^{-5} , достигаемой при НУ, более чем на два порядка, т. е. до 10^{-3} . Таким образом, примерно на каждые 10 °С изменения температуры стабильность изменяется на порядок.

3. Механические воздействия — удары, например при разделении ступеней, и вибрация, как в определенном диапазоне частот, так и широкополосная (ШСВ) при транспортировании автомобильным и железнодорожным транспортом.

Внешние дестабилизирующие факторы:

- температура окружающей среды, о влиянии которой говорилось выше;
- механические воздействия, приводящие к нарушению контактов (пайки, разъемы);
- электромагнитные излучения (ЭМИ), приводящие к возникновению или искажению сигналов в цепях связи, образующих контуры (антенны);
- ионизирующее излучение (ИИ).

Действие ИИ можно рассматривать на коротком и длительном интервале. Короткое (импульсное) ИИ характерно для ядерного взрыва (ЯВ) или аварий ядерно-энергетических установок (ЯЭУ). Длительное — это фон от реакторов, от осколков

деления в конструкционных материалах, вызванных, например, потоком нейтронов ЯВ, ЯЭУ или реактора, а также потоком тяжелых заряженных частиц (ТЗЧ) космического излучения (например, протонов).

Импульсное ИИ делится по воздействию на два фактора:

1) тяжелые частицы (*альфа-частицы* и нейтроны). Альфа-излучение хорошо тормозится в конструкции приборных отсеков и корпусов РЭА и изделия, практически не достигает ЭРИ. Нейтроны имеют хорошую проникающую способность и могут вызвать ядерные реакции с возникновением радиоактивных осколков, испускающих γ -излучение;

2) γ -излучение — это основной фактор, вызывающий ионизацию материала из-за возникновения свободных электронов, вырванных с орбиты при взаимодействии γ -кванта с атомом. При этом остается положительно заряженный ион.

Таким образом, при взаимодействии γ -излучения с материалами ЭРИ возникают дополнительные носители заряда, в результате чего в изоляционных материалах, например в печатных платах, могут возникнуть токи утечки, т. е. идет потеря изоляционных свойств и возникают паразитные связи между активными элементами с ненормированным сопротивлением. В полупроводниковых материалах возникает проводимость, при этом возможно открытие переходов n - p - n или p - n - p в транзисторах, возрастает проводимость. Кроме того, после снятия γ -излучения в изолирующих слоях может «застрять» наведенный заряд, который будет существенно искажать работу МОП-транзистора. В этом случае говорят о влиянии дозового фактора ИИ, который может сохраняться длительное время после окончания γ -воздействия. Со временем под влиянием тепловых процессов этот паразитный заряд будет «рассасываться» как за счет рекомбинации электронов, так и за счет дрейфа в электрических полях и сбора заряда на электродах полупроводниковых приборов. Это явление «рассасывания» наведенного заряда называют «отжигом». Процесс идет тем быстрее, чем выше температура окружающей среды.

Взаимодействие γ -квантов с веществом происходит за счет следующих факторов: *фотоэффект*, *комптоновское рассеивание* и *образование пар* (электрон + позитрон).

При фотоэффекте происходит «сбивание» квантом электронов внешних оболочек атома, когда энергии кванта достаточно для разрыва связи электрона с ядром.

Комптоновское рассеивание дает свободный электрон и «рассеянный» (отскакивающий) γ -квант с энергией меньше на величину энергии, отданной на «сбивание» электрона.

Следует отметить, что наибольший вклад в ионизацию вносит фотоэффект, который возможен при небольших величинах энергии γ -кванта (т. е. с энергией, сдвинутой к энергии видимого света). При возрастании энергии γ -квантов начинает преобладать комптоновское рассеивание. Образование пар идет при высоких энергиях и на практике вклад этого фактора в ионизацию незначителен.

Необходимо иметь в виду, что при взаимодействии γ -излучения с материалом корпусов (защит) идет сдвиг энергии γ -излучения в более «мягкую» область, где вероятность фотоэффекта выше, т. е. образуется больше электронов. Таким образом, введение защит дает двойственный эффект.

С одной стороны, эффект будет положительный за счет отражения от ядер атомов вещества защит. Эффективность защит тем выше, чем выше атомный номер вещества, так как отражение идет только от ядер, и чем больше ядро, тем выше вероятность столкновения с ним.

С другой стороны, введение защит приводит в результате комптоновского рассеивания к сдвигу γ -излучения «вниз» по энергии, в результате чего к полупроводнику приходят γ -кванты, обладающие большей ионизирующей способностью.

Таким образом, при введении защит (экранов) необходимо стремиться сделать их такой величины (толщины), чтобы полностью поглотить поток γ -квантов в материале защит. На практике вводят многослойные экраны из разных материалов.

Третий вид взаимодействия γ -квантов — образование пар — имеет малую вероятность и происходит только при больших

величинах энергии γ -квантов, поэтому при большинстве обычных встречающихся на практике энергиях γ -излучения его вклад в ионизацию незначителен.

Необходимо иметь в виду, что чем ниже энергия γ -излучения, тем выше ионизационный эффект, но при этом энергии должны быть достаточно для ионизации. Поэтому наибольшей ионизирующей способностью из всех видов ЭМИ обладает рентгеновское излучение, особенно сверхжесткое (СЖРИ), энергии которого достаточно для срыва электрона из материала полупроводника и достаточно велика вероятность взаимодействия с электронной оболочкой.

4.2. Дестабилизирующие факторы космического пространства

В околоземном и межпланетном пространствах космические аппараты подвергаются воздействию разнообразных факторов космического пространства (ФКП). В общих чертах известен ряд ФКП, влияющих на работу КА и способных нарушить (повредить) ее. В табл. 4.1 на примере оптико-электронной техники представлены основные ФКП.

ИИ состоит из потока первичных заряженных ядерных частиц (электроны, протоны и ТЗЧ), а также вторичных ядерных частиц — продуктов ядерных превращений, обусловленных первичными частицами. Основные эффекты воздействия ИИ и РЭА обусловлены ионизационными и ядерными потерями энергии первичных и вторичных частиц в чувствительных объемах элементов интегральных микросхем (ИМС) и полупроводниковых приборов (ПП) — транзисторов и диодов.

Эти эффекты проявляются через:

- параметрические отказы РЭА вследствие деградации характеристик ИМС и ПП по мере накопления дозы ИИ;
- кратковременные нарушения работы (сбои) ИМС от действия отдельных высокоэнергетических частиц.

Влияние ИИ совместно с космической плазмой проявляется через электризацию защитных и тормозящих покрытий.

По мере достижения критического заряда может происходить внутренний локальный электростатический пробой, приводящий к сбою или отказу полупроводникового прибора.

Возможен также косвенный эффект через действие электромагнитного поля, возникающего при пробое.

Таблица 4.1
Основные эффекты от действия ФКП в бортовой РЭА

ФКП	Эффект в бортовой РЭА	Характеристики ФКП и сопутствующих факторов
1. ИИ естественных радиационных поясов Земли	Деградация параметров ИМС, отказы и сбои в работе РЭА	Флюенсы потоков ИИ, их энергетические спектры, зарядовое состояние и пространственно-временное распределение потоков заряженных частиц
2. Космическая плазма	Сбои и отказы РЭА из-за паразитных отказов, наводок и пробоев; загрязнение (потемнение) элементов оптических устройств из-за распыления материалов; ухудшение свойств терморегулирующих покрытий из-за растрескивания и частичного испарения материала; паразитные высокочастотные наводки на электрические цепи; изменение свойств оптических покрытий, фильтров, клеев и т. д.; изменение характеристик ЭРИ из-за влияния температурных эффектов	Параметры плазмы на разных орбитах КА; параметры электризации КА; предельный статический потенциал; частота разрядов; спектры электромагнитных и оптических помех; параметры первичной и вторичной фотоэмиссии

Продолжение табл. 4.1

ФКП	Эффект в бортовой РЭА	Характеристики ФКП и сопутствующих факторов
3. Невесомость	Отсутствие конвекционного теплообмена и, как следствие, локальные перегревы и деградация характеристик ЭРИ; отсутствие механических нагрузок под действием силы тяжести; экранирование поля зрения ОЭС распыленными от КА частицами (плохая мехообстановка)	Температурные поля, их градиенты над поверхностями (солнечная — теневая сторона)
4. Тепловое излучение Солнца	Изменение оптических свойств материалов, изменение характеристик ЭРИ из-за влияния температуры, накопление статического заряда (термо-ЭДС)	Характеристики тепловых потоков на солнечной и теневой стороне КА, диапазон и градиенты изменения температуры; температурные поля и их градиенты над поверхностями в вакууме
5. Собственная атмосфера (пыль) от КА	Загрязнение внешних покрытий, световые помехи (ложные светила)	Характеристики ионно- и газопылевой атмосферы (состав и плотность частиц, их пространственно-временное распределение и зарядовое состояние)

Окончание табл. 4.1

ФКП	Эффект в бортовой РЭА	Характеристики ФКП и сопутствующих факторов
6. Микрометеориты	Эрозия оптических поверхностей, нарушение механических характеристик корпуса; необратимые отказы РЭА	Плотность потока, масса и скорость микрометеоров
7. Космический вакуум	Ухудшение теплоотвода в негерметизированных отсеках, «холодная сварка» контактов в разъемах и механических приводах	Давление и концентрация газовых частиц
8. Замкнутый объем	Отсутствие хорошего потенциала «земли», возникновение поверхностных токов (перетекание статических зарядов) и возникновение наводок	Амплитудно-временные характеристики сигналов помех от перетекания зарядов

Неравномерный разогрев конструкции КА от Солнца, попадание в зону тени Земли и других планет или космических объектов вызывает значительные циклические изменения температуры поверхностей, от чего возникают низкочастотные термомеханические напряжения и могут возникать термо-ЭДС.

Из-за невесомости ухудшается тепловой режим работы РЭА, так как нет конвекции. Возможен разогрев ЭРИ за счет собственного тепловыделения.

Действие микрометеоритов приводит к механическим повреждениям корпусов КА и приборов. Наиболее подвержены этому солнечные батареи.

Отсутствие «привычной» шины земли (нулевого потенциала) приводит к тому, что нулевой потенциал колеблется,

а протекание поверхностных токов по корпусам КА и приборов служат дополнительным источником наведения помех на сигнальные цепи.

Таким образом, эксплуатационные условия бортовой РЭА космических аппаратов определяются большим числом факторов различной природы. Можно выделить ряд независимых факторов (невесомость, микрометеориты), а остальные рассматривать с точки зрения радиационного и теплового воздействия, которые коррелируют между собой по влиянию на работу ЭРИ.

В связи с наличием многих факторов, каждый из которых может вызвать сбой или катастрофический отказ РЭА, влияние первых двух, а именно ИИ и плазмы, доминирует. Они в основном определяют отказы РЭА, с которыми трудно бороться путем конструирования.

Уровень радиационной стойкости РЭА космического аппарата, определенный по результатам измерений, должен соответствовать по дозовому фактору $(0,6 \dots 2) \times 10^6$ рад, что обусловлено образовавшимися в результате испытаний ядерных боеприпасов искусственными радиационными полями Земли.

Резкое увеличение потоков частиц в моменты мощных солнечных вспышек также может приводить к катастрофическим отказам и сбоям РЭА. Например, при солнечной вспышке 20 января 1994 г. возникли функциональные отказы в системе стабилизации спутника связи «Anik-E1» [3].

Примером влияния радиационных эффектов является поведение КМОП БИС ОЗУ NEC 64 К при относительно спокойной радиационной обстановке. В этой БИС за неделю работы наблюдалось в среднем 2,4 сбоя и 0,76 эффектов «защелкивания» (так называемый «тиристорный» эффект) [4].

4.3. Радиационные пояса Земли

Оценке радиационной обстановки в околоземном космическом пространстве уделялось значительное внимание с первых шагов освоения космического пространства.

Известные модели построены на базе данных, полученных с ряда спутников [5, 6, 7]. Пример одной из моделей для суммарного потока электронов (e^-) за год вне КА на орбитах с $h = 50$ км и наклонением $97,5^\circ$ приведен на рис. 4.3.

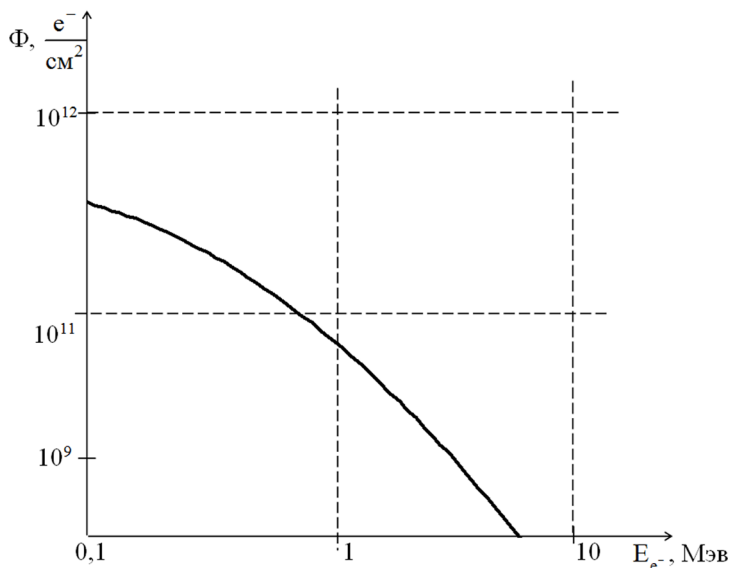


Рис. 4.3. Интегральный поток электронов за год
на орбитах с $h = 500$ км, наклонением $97,5^\circ$

Перечень вопросов для самоконтроля

1. Какие три основных дестабилизирующих фактора в порядке их весомости снижают надежную работу аппаратуры САУ?
2. Какие виды внешних излучений влияют на устойчивость работы аппаратуры и какое излучение представляет наибольшую сложность при решении задачи защиты от него?
3. В чем принципиальное отличие защит от потока нейтронов и проникающего гамма-излучения?
4. Что надо учитывать при введении пассивных защит от гамма-излучения?

5. На что влияет невесомость при работе аппаратуры в САУ космических аппаратов?
6. Что вызывает накопление статических зарядов на поверхности космического аппарата?
7. Чем опасны микрометеориты?
8. Какие факторы космического пространства вызывают повреждение оптоэлектронных устройств?
8. Какими способами можно нейтрализовать отсутствие конвекции воздуха в приборах при работе в космосе?
9. Чем опасно быстрое отделение (отстрел) элементов конструкции аппарата в космосе?
10. Какие способы исключения разряда статического электричества при разделении элементов конструкции аппарата в космосе могут быть применены, по Вашему мнению?

5. Факторы, влияющие на надежность подсистем САУ

5.1. Основные понятия теории надежности

Приведем несколько определений в соответствии с [8]. Обширные пояснения к этим определениям приведены в [9].

Надежность — свойство объекта сохранять способность выполнять заданные функции. Это сложное свойство, которое включает в себя безотказность, долговечность, ремонтпригодность и сохраняемость или сочетание этих свойств объекта. Для конкретных объектов и условий их эксплуатации эти свойства могут менять свою значимость.

Объект — техническое изделие определенного целевого назначения (системы и их части, т. е. устройства, машины, аппараты, приборы, агрегаты и отдельные детали, компоненты).

Система — объект, представляющий собой совокупность элементов, взаимодействующих в процессе выполнения определенного круга задач и взаимосвязанных функционально.

Подсистема — элемент системы, объект, представляющий часть системы, отдельные части которого не имеют самостоятельного применения в рамках конкретного рассмотрения.

В определениях видна некоторая путаница. Понятия «система» — «элемент» выражены друг через друга, в противном случае одно из них следовало бы постулировать, т. е. ввести без определения и пояснений.

Понятия эти относительные, так как объект, считающийся системой в одном рассмотрении, можно рассматривать как элемент при переходе к рассмотрению объекта большего масштаба.

Кроме того, само деление системы на элементы зависит от характера рассмотрения (функциональные, конструктивные, схемные или оперативные элементы), от требуемой точности проводимого рассмотрения, от уровня наших представлений, от объекта в целом и, наконец, даже от технических и научных предпочтений исследователя или разработчика.

Безотказность — свойство объекта непрерывно сохранять работоспособность в течение определенного времени.

Долговечность — свойство объекта сохранять работоспособность до перехода в состояние, при котором становится невозможным выполнение целевых функций объекта.

Работоспособность — состояние, при котором объект способен выполнять заданные функции, сохраняя значения основных своих параметров в пределах, установленных нормативно-технической документацией — техническими условиями (ТУ) на приборы, ЭРИ, подсистему или АСУ в целом.

Неработоспособность — состояние объекта, при котором значение хотя бы одного параметра не соответствует требованиям (нормам) ТУ.

Понятие «исправность» шире, чем «работоспособность», так как работоспособный объект в отличие от исправного удовлетворяет лишь тем требованиям ТУ, которые обеспечивают его правильное функционирование, т. е. выполнение целевой функции.

Работоспособность и неработоспособность в общем случае могут быть полными или частичными.

Полностью работоспособный объект обеспечивает в определенных условиях максимальную эффективность его применения.

Эффективность применения в тех же условиях частично работоспособного объекта меньше максимально возможной, но значения ее показателей еще находятся в установленных для такого функционирования пределах, которые считаются допустимыми.

Частично неработоспособный объект может функционировать, но уровень эффективности при этом ниже допустимого.

Полностью неработоспособный объект применять по назначению невозможно.

Понятия работоспособности и частичной работоспособности применяют в основном к «большим» (сложным) системам, для которых характерна возможность пребывания в нескольких состояниях. Примером таких систем является БУВК САУ изделий РКТ.

Для некоторых объектов работоспособность и неработоспособность могут быть только полными, т. е. они могут иметь только два состояния.

Работоспособный объект, в отличие от *исправного*, обязан удовлетворять лишь тем требованиям ТУ, выполнение которых обеспечивает применение его по назначению. При этом он может не удовлетворять, например, эстетическим требованиям (требованиям по внешнему виду). Если несоответствие внешнего вида (например, царапины на покраске) нормам ТУ не препятствует его правильному функционированию и обеспечивается выполнение целевых функций, объект будет работоспособным. Применительно к ЭРИ внешний вид должен обеспечивать их дальнейший монтаж (установку) в аппаратуру.

Таким образом, работоспособный объект может быть неисправным, но отклонения от норм ТУ не препятствуют выполнению целевых функций.

Предельное состояние — состояние объекта, при котором его дальнейшее применение по назначению должно быть прекращено из-за неустранимых нарушений требований безопасности или неустранимого отклонения заданных параметров за установленные пределы, недопустимого увеличения эксплуатационных расходов или необходимости проведения капитального ремонта. Признаки (критерии) предельного состояния устанавливаются нормативно-технической документацией на данный объект. Примерами могут быть катапультирование или затопление станции «Мир».

Невосстанавливаемый объект достигает предельного состояния при возникновении отказа или при достижении заранее уста-

новленного срока службы или суммарной наработки. Предельно допустимые сроки службы и наработки устанавливаются из соображений безопасности эксплуатации в связи с необратимым снижением эффективности использования ниже допустимой по практическим соображениям или в связи с увеличением интенсивности отказов, закономерным для объектов данного типа после установленного срока эксплуатации. Пример — снятие с эксплуатации авиалайнеров в сроки, установленные по результатам ресурсных испытаний для данного типа авиалайнера.

Для восстанавливаемых объектов (например, трубопроводов) переход в предельное состояние определяется наступлением момента, когда дальнейшая эксплуатация невозможна или нецелесообразна вследствие следующих причин:

- становится невозможным поддержание безопасности, безотказности или эффективности объекта на минимально допустимом уровне;

- в результате износа или старения объект пришел в такое состояние, при котором ремонт требует недопустимо больших затрат (дешевле взять или сделать новый) или не обеспечивает необходимой степени восстановления исправности или ресурса.

Для некоторых восстанавливаемых объектов предельным состоянием считается такое, при котором необходимое восстановление невозможно из-за высокой стоимости.

Отказ — событие, заключающееся в нарушении работоспособности объекта.

Критерий отказа — отличительный признак или их совокупность, согласно которым устанавливается факт возникновения отказа. Признаки (критерии) устанавливаются нормативно-технической документацией на объект.

Восстановление — процесс обнаружения и устранения отказов (повреждения) с целью восстановления работоспособности (исправности) объекта.

Невосстанавливаемый объект — объект, работоспособность которого в случае возникновения отказа не подлежит восстановлению в реальных условиях.

При анализе надежности, в том числе при выборе показателей надежности объекта, существенное значение имеет решение, которое должно быть принято в случае отказа объекта.

Если в рассматриваемой ситуации восстановление работоспособности объекта при его отказе по каким-либо причинам признается нецелесообразным или неосуществимым (например, из-за невозможности прерывания выполняемой операции или технологического процесса), то такой объект в данной ситуации является невосстанавливаемым. Примером могут быть трубопроводы АЭС.

Таким образом, один и тот же объект в зависимости от особенностей или этапов эксплуатации может считаться восстанавливаемым или невосстанавливаемым. Например, аппаратура СУ объектами РКТ является восстанавливаемой на этапе хранения, а при работе в космосе — невосстанавливаемой.

Кроме того, один и тот же объект можно отнести к тому или иному типу в зависимости от назначения и момента работы. Например, ЭВМ, входящая в состав БУВК, невосстанавливаемая во время решения оперативных задач управления (например, задач стабилизации) и восстанавливаемая при решении циклических задач расчета параметров движения (в частности, для спутников решение некоторых задач зондирования поверхности Земли может быть повторено на очередном витке).

5.2. Методы повышения надежности

Резервирование — метод повышения надежности введением дополнительных элементов или функциональных возможностей сверх минимально необходимых для выполнения заданных функций.

Структурное резервирование — использование избыточных элементов, входящих в структуру объектов. Иногда его называют функциональным, когда есть устройства с разным принципом функционирования. Примером может быть система защиты тяговых сетей электротранспорта, где есть электромехани-

ческие и чисто электронные устройства, взаимодополняющие друг друга.

Временное резервирование — способ повышения надежности, предусматривающий использование избыточного времени, выделяемого для выполнения задачи (пример — повышение производительности БУБК).

Информационное резервирование — метод повышения надежности путем использования избыточной информативности сверх минимально необходимой для решения задачи (пример — пересчет информации четырех измерителей системы координат в трехмерную систему координат, т. е. использование информации четвертого, резервного, измерителя).

Функциональное резервирование — метод повышения надежности путем использования возможности элемента выполнять дополнительные функции (т. е. решать дополнительные задачи) вместо основных или наряду с ними (например, перераспределение задач в многопроцессорном или многомашинном УБК).

Нагрузочное резервирование — метод повышения надежности за счет использования способности элементов объекта принимать дополнительную нагрузку сверх номинальной (пример — использование параллельных диодов в цепях питания РЭА, когда при отказе одного диода всю нагрузку берет второй).

Основной элемент — элемент основной физической структуры, минимально необходимой объекту для выполнения задач.

Резервный элемент — элемент, предназначенный для обеспечения работоспособности объекта в случае отказа основного элемента.

Восстанавливаемый резерв — резервные элементы, работоспособность которых в случае отказа подлежит восстановлению в процессе функционирования объекта или его хранения.

Кратность резервирования — отношение числа резервных элементов к числу резервируемых элементов объекта.

Дублирование — резервирование, когда одному основному элементу придается резервный.

5.3. Показатели безотказности и ремонтпригодности

Наработка до отказа — вероятность того, что в пределах заданного времени наработки отказ объекта не возникнет (при условии полной работоспособности на начальный момент времени).

Наработка между отказами объекта, состоящего из стареющих элементов, зависит от количества (числа) предыдущих отказов. Однако с ростом номера отказа (т. е. с увеличением длительности эксплуатации) эта величина стремится к некоторому установившемуся значению или, как говорят, к своему стационарному значению.

Средняя наработка на отказ — отношение наработки восстанавливаемого объекта за некоторое время к математическому ожиданию числа отказов в течение этого времени. Этим термином можно назвать коротко среднюю наработку до отказа и среднюю наработку между отказами, когда оба показателя совпадают. Для совпадения последних необходимо, чтобы после последнего отказа объект восстанавливался, т. е. переходил в исходное состояние.

Заданная наработка — наработка (время), в течение которой объект должен безотказно работать и выполнять свои функции.

Среднее время простоя — математическое ожидание случайной продолжительности восстановления работоспособности (собственно ремонта).

Вероятность восстановления — вероятность того, что фактическая продолжительность восстановления не превысит заданной.

Показатель технической эффективности функционирования — мера качества функционирования объекта, т. е. выполнения им своего целевого назначения или целесообразности использования объекта для выполнения данных функций. Показатель технической эффективности функционирования объекта определяется количественно, как математическое ожидание выходного эффекта объекта, т. е. в зависимости от назначения он принимает конкретное значение.

Интенсивность отказов — условная плотность вероятности отказа невосстанавливаемого объекта, определяемая для рассматриваемого момента времени при условии, что до этого момента отказ не возник.

5.4. Показатели долговечности и сохраняемости

Гамма-процентный ресурс — наработка, в течение которой объект не достигает предельного состояния с вероятностью, равной $(1 - \gamma)$.

Средний ресурс — математическое ожидание ресурса.

Назначенный ресурс — суммарная наработка, по истечении которой эксплуатация должна быть прекращена независимо от состояния объекта.

6. Критерии оценки эффективности и надежности сложных систем

Предварительные замечания

В дальнейшем под словом «объект» будем понимать не абстрактное техническое изделие, а совершенно определенные технические средства: САУ ракет-носителей (САУ РН), выводящих полезную нагрузку в заданную точку (район) космического пространства; САУ КА— искусственных спутников Земли и межпланетных аппаратов. Именно эта особенность определяет рассматриваемые САУ как объекты, невосстанавливаемые в процессе эксплуатации (исключение при этом касается восстановления работы бортовых вычислительных средств после сбоя, вызванного мощными внешними электромагнитными или ионизирующими импульсами излучения).

При анализе надежности, в том числе при выборе показателей надежности, существенное значение имеет решение, которое должно быть принято при отказе САУ РН или САУ КА, аппаратура которых является невосстанавливаемой в процессе работы (выполнения основной задачи).

Предварительно введем обозначения: $f_1(t)$ — плотность распределения $F_1(t)$, $F_1(t) = P\{\xi_1 \leq t\}$ — распределение времени до первого отказа, P — вероятность того, что момент первого отказа ξ_1 будет не более t .

Вероятностное определение. Вероятность безотказной работы в интервале от 0 до t_0 $P(t_0) = P(0, t_0) = P(\xi_1 \leq t) = 1 - F_1(t_0)$, т. е. $P(t_0)$ — вероятность того, что объект проработает безотказно в интервале от 0 до t_0 .

Статистическое определение. $P(t_0) = N(t_0) / N(0) = 1 - n(t_0) / N(0)$, где P — отношение числа объектов, безотказно проработавших до t_0 ($N(t_0)$), к числу объектов, исправных на начальный момент ($N(0)$).

Иногда само выполняемое САУ задание имеет случайную длительность ξ , имеющую свою функцию распределения $W(t) = P\{\xi \leq t\}$. В этом случае полная вероятность безотказной работы САУ за время выполнения задания запишется как $P_0 = \int_0^{\infty} P(t) dW(t)$.

Вероятность отказа САУ в интервале от 0 до t определяется как дополнение $Q(t_0) = 1 - P(t_0) = 1 - \hat{P}(t_0)$.

Статистическое определение. $1 - \hat{P}(t, t + t_0) = N(t + t_0) / N(t)$, т. е. \hat{P} — отношение числа объектов (САУ), проработавших до момента времени $t + t_0$, к числу объектов, исправных к моменту времени t , или частота события, состоящего в том, что реализация наработки объекта до отказа окажется больше величины $t + t_0$ при условии, что эта реализация больше t .

Вероятность отказа в интервале от t_0 до $t + t_0$ определяется как дополнение до 1: $Q(t, t + t_0) = 1 - P(t, t + t_0)$; $Q(t, t + t_0) = 1 - \hat{P}(t, t + t_0)$.

Интенсивность отказов объекта в момент t запишется как

$$\lambda(t) = \frac{1}{1 - F(t)} \frac{d}{dt} F(t) = \frac{f(t)}{P(t)},$$

где $\lambda(t)$ — условная вероятность отказа объекта к моменту t , при условии, что до этого отказа не было.

Т. е. $\lambda(t)$ — это условная плотность вероятности отказа к моменту t , при условии, что до этого момента отказа не было.

6.1. Критерии оценки эффективности и надежности БУВК как сложных систем

Современные БУВК проектируются как системы, содержащие несколько бортовых цифровых вычислительных машин (БЦВМ), которые могут работать как в режиме независимого решения разных задач, так и в режиме резервирования. При этом при исправности всех БЦВМ системы решается максимальный объем задач, а при возникновении отказа какой-либо БЦВМ решение ее задач переходит к другой БЦВМ, находящейся в резерве.

Если отказы возникли в нескольких БЦВМ и все резервные БЦВМ переведены в рабочий режим, то возникает проблема — что делать при возникновении еще одного отказа.

В этой ситуации в пределах ограничений на массу и объемы бортовой аппаратуры и ее стоимости можно вводить больше резервных БЦВМ, чтобы с запасом обеспечить требуемую (заданную в ТЗ) вероятность безотказной работы БУВК на протяжении всего времени работы САУ. Для САУ РН это время от старта до момента выведения (доставки) полезной нагрузки в заданную точку.

Как правило, в ТЗ на САУ задается величина вероятности выполнения этой задачи с определенной точностью. Обычно задается вероятностное отклонение от траектории на момент завершения работы. Вероятность выполнения задачи включает в себя две составляющие, одна из которых — это алгоритмическая вероятность выполнения заданной точности при условии исправной работы аппаратуры САУ от момента старта (t_0) до момента отделения полезной нагрузки (t_K).

Для увеличения вероятности выполнения задачи необходимо стремиться увеличить вероятность безотказной работы всех подсистем, в том числе БУВК.

На практике эта проблема решается комплексом мероприятий. Основные принципы обеспечения надежности БУВК в порядке важности (весомости) можно представить в виде пирамиды (рис. 6.1).



Рис. 6.1. Меры обеспечения надежности

Первый уровень (приоритет) — простота технических решений. Как правило, это использование технических решений, ориентированных на использование в производстве технологий, основанных на базовых отработанных конструкторских и схмотехнических решениях. В итоге это культура проектирования, в частности использование отработанных методик расчета.

Второй приоритет имеет применение надежных ПКИ, при этом необходимо сократить номенклатуру ПКИ, например типов интегральных микросхем, а также сократить количество предприятий-поставщиков, так как целесообразно сконцентрировать на ограниченном числе предприятий-изготовителей ЭРИ не только технологические и интеллектуальные ресурсы разработчиков, но и финансовые ресурсы.

Третий приоритет — это полнота отработки КД, как на моделях, так и на опытных и экспериментальных образцах приборов САУ. В связи с этим большую весомость имеет уровень культуры производства, т. е. применение отработанных технологических процессов, имеющих максимальную степень автоматизации.

Четвертый приоритет имеет непрерывная работа по обеспечению качества в процессе производства, для чего каждый

отказ анализируется комиссией, состоящей из представителей производства, разработчиков КД и технического контроля. Результатом работы комиссии является выработка практических рекомендаций (мероприятий) по исключению данного вида отказа (дефекта) в дальнейшем.

Таким образом, в течение всего времени изготовления данного вида аппаратуры САУ идет непрерывная работа по обеспечению качества изготавливаемой РЭА, т. е. в конечном итоге — работа по обеспечению надежности САУ в эксплуатации.

Выполнение этих основных принципов является базой для обеспечения надежности и только при их безукоснительном выполнении можно переходить к решению задач повышения надежности путем введения избыточности, т. е. резервирования различного вида.

Вопросы рационального резервирования достаточно сложны в связи со сложностью самой САУ и ее центрального звена — БУВК.

Основной проблемой при решении задачи резервирования является специфика САУ изделий РКТ, для которых характерны очень жесткие ограничения на массу, габариты и энергопотребление аппаратуры. Очевидно, что введение любого вида резервирования противоречит требованию минимизации массы, габаритов и энергопотребления. В связи с этим крайне спорным является тезис, некогда пользовавшийся популярностью в среде теоретиков в части методов повышения надежности, а именно: «за счет резервирования можно получить сколь угодно высокий уровень надежности».

Необходимо иметь в виду, что несоблюдение основных принципов («пирамиды») приведет к тому, что при резервировании просто возрастет суммарный поток отказов, так как к отказам основных компонентов добавятся отказы резервных. Учитывая, что подключение резерва, как правило, требует физических (электрических) связей основной и резервной аппаратуры, возникает серьезная проблема нераспространения неисправностей от резервных блоков к основным. Вопросом

оптимизации резервирования уделено значительное внимание и существует достаточно обширная литература. Из всех источников целесообразно отметить монографию [10].

Учитывая специфику функционального назначения САУ, а именно вероятностный характер целевой функции системы — обеспечение вывода полезной нагрузки в заданный район с определенной заданной вероятностью (B) достижения точности вывода, для выбора оптимального варианта построения БУВК можно использовать техническую эффективность — как вероятность выполнения задания системой в целом [11, 12]. Эта вероятность B определяется произведением вероятностей безотказной работы аппаратуры $P(t)$ и алгоритмической эффективности $E(\eta)$ как вероятности выполнения задания системой при условии безотказной работы аппаратуры.

$$B = P(t) \cdot E(\eta),$$

где $P(t)$ — вероятность безотказной работы аппаратуры САУ;

$E(\eta)$ — алгоритмическая вероятность выполнения задачи при условии безотказной работы аппаратуры.

На значение $E(\eta)$ влияют точностные характеристики датчиков (например, инерциальной подсистемы), алгоритмические (методические) погрешности алгоритмов управления, вычислительные ошибки при решении задач в БУВК. Влияют также внешние факторы, например климатические условия на разных участках траектории как активного, так и пассивного участков полета.

Вероятность безотказной работы аппаратуры $P(t)$ является достаточно самостоятельной и учитывается в оценке общей вероятности выполнения задачи.

Как уже отмечалось, стремление максимизировать $P(t)$ может оказаться нерациональным, так как аппаратные ресурсы в ряде случаев целесообразно направить не на увеличение кратности резервирования, а на увеличение величины компоненты $E(\eta)$, например путем увеличения состава или сложности решаемых задач за счет введения подсистем коррекции

параметров движения (подсистем спутниковой и оптической коррекции, подсистемы коррекции по геофизическим полям и т. п.).

Введение функциональных подсистем и соответственно задач уточнения параметров движения требует увеличения вычислительной мощности БУВК, на вычислители которого возлагается решение не только основных задач по управлению движением, но и задач повышения точностных характеристик. Выбор рационального варианта требует решения задачи оптимизации распределения вводимых аппаратурных ресурсов, т. е. выбора пути, куда целесообразнее направить дополнительное оборудование — на повышение $P(t)$ за счет увеличения кратности резервирования или на повышение точностных характеристик за счет решения дополнительных задач и увеличения значения функции $E(\eta)$.

Вопросы оптимального распределения ресурсов рассмотрим на примере многомашинного БУВК, содержащего в своем составе несколько идентичных вычислителей (бортовых вычислительных машин).

В современных САУ задачи, решаемые БУВК, можно разбить на два уровня:

1) Задачи абсолютной важности — это задачи стабилизации и навигации, невыполнение которых означает полное невыполнение САУ своих целевых функций, так как приводит к потере управления изделием и ни о какой точности не может быть речи.

2) Задачи относительной важности, решение каждой из которых повышает вероятность выполнения целевой задачи, а именно — вероятности доставки полезной нагрузки с требуемой точностью, т. е. решение задач относительной важности повышает точностные характеристики работы САУ.

Таким образом, $E(\eta)$ — векторная функция, зависящая от состава решаемых задач абсолютной и относительной важности. Введем обозначения весомости задач:

η_0 — задача абсолютной важности;

$\eta_1, \eta_2, \eta_3, \dots, \eta_n$ — задачи относительной важности, где η_i — относительный вклад каждой задачи в повышение вероятности выполнения задачи.

При распределении задач целесообразно с наибольшей надежностью решать задачи абсолютной важности (т. е. η_0), невыполнение этих задач, как уже было отмечено, приводит к потере объектом управления. Таким образом, при снятии с решения задач абсолютной важности η_0 вектор $E(\eta_i) = 0$ и, следовательно, целевая функция $B = P(t) \cdot E(\eta_i) = 0$.

Для решения дополнительных задач η_i , повышающих вероятность выполнения задания (т. е. повышающих точность вывода), необходимо увеличивать производительность БУВК, для чего в его состав добавляют дополнительные вычислительные машины (модули).

Современные БУВК САУ РН строятся по магистрально-модульному принципу, когда к общей магистрали подключается необходимое количество вычислительных модулей (ВМ) или модулей каналов обмена (МКО). На рис. 6.2 приведена структурная схема БУВК.

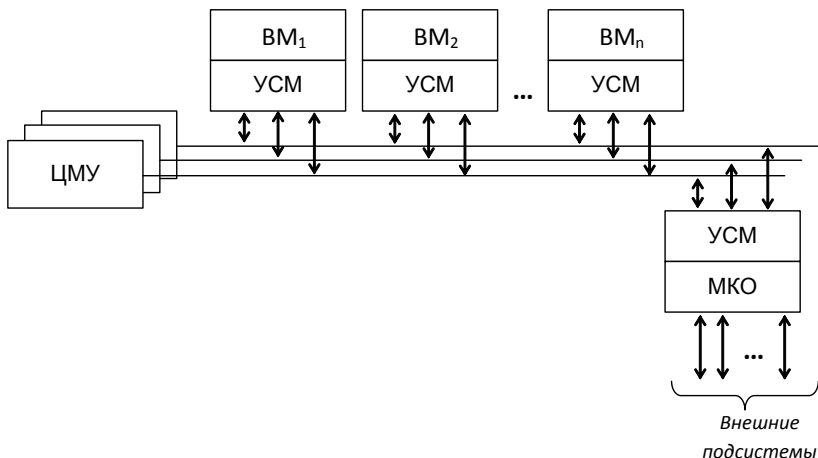


Рис. 6.2. Структура магистрально-модульного БУВК

Управление взаимодействием модулей между собой и контроль их исправности осуществляет центральный модуль управления (ЦМУ) или, как его обычно называют, системный модуль (СМ), который представляет собой также вычислительную машину, аппаратурные затраты которой минимизированы для обеспечения надежности, например разрядность уменьшена до 16 (вместо 32-разрядной шкалы ВМ, от которых требуются высокоточные вычисления). СМ решает, как правило, задачи логического характера и от него не требуется высокой производительности при решении функциональных задач управления, поэтому в ряде случаев для повышения надежности его реализуют как вычислитель с мажоритарией на уровне блоков процессор — запоминающее устройство — блок управления магистралью [13].

СМ управляет трехкратно резервированной магистралью, к которой через свои устройства связи с магистралью (УСМ) подключены остальные модули ВМ и МКО.

Количество ВМ определяется требуемой производительностью и степенью резервирования. Количество МКО определяется составом периферийных подсистем, при этом МКО, работающие на одно направление, как правило, дублируют.

Описанная структура БУВК позволяет в пределах заданных ограничений на его массу, габариты и энергопотребление включать (перераспределять) в процессе работы в зависимости от состава задач на каждом участке полета необходимое количество модулей, работающих или в режиме параллельного счета функциональных задач, или в режиме резервного счета.

С целью максимизации целевой функции $B = P(t) \cdot E(\eta)$ необходимо рационально назначать в процессе работы ВМ или в режим параллельного счета с целью повышения алгоритмической эффективности $E(\eta)$, или в режим резервного счета с целью повышения надежности, т. е. величины $P(t)$.

Из-за возможных отказов ВМ в процессе работы возникает задача динамически находить оптимальное распределение ресурсов для каждого участка полета и каждого состояния ис-

правности ВМ. Очевидно, что эта задача не может быть решена заранее перед началом работы САУ, так как поток отказов ВМ носит случайный характер и задачу динамического распределения ресурсов можно решить только в полете. Показано, что задача оптимального распределения ресурсов может быть решена на борту в СМ с помощью модификации метода динамического программирования [14].

Таким образом, современные БУВК — это сложные системы, динамически реконфигурируемые в процессе полета, с гибкой структурой, но с фиксированным составом определенных модулей и связями между ними.

БУВК — это сложная система с гибкой архитектурой, распределение задач и резерва в которой на каждый момент полета заранее неизвестно. Эта гибкость архитектуры позволяет, в отличие от известных способов повышения надежности путем резервирования, решить задачу максимизации технической эффективности БУВК, определяемой через вероятность выполнения задачи САУ, а не решать частную задачу повышения надежности аппаратуры той или иной подсистемы САУ.

Таким образом, при оценке качества разрабатываемой вычислительной системы целесообразно от частных критериев (таких как быстродействие, емкость запоминающих устройств, энергопотребление, масса и габариты) перейти к комплексному показателю — оценке качества через критерий верхнего уровня, а именно вероятности выполнения задания САУ, а частные критерии перевести в ранг ограничений.

Перечень вопросов для самоконтроля

1. Почему использование критерия технической эффективности предпочтительнее оценки качества БУВК по частным критериям надежности?
2. Каковы основные составляющие критерия технической эффективности?
3. В чем заключается сложность решения задачи оптимизации технической эффективности БУВК в процессе полета?

4. Возможно ли, по Вашему мнению, создание надежной аппаратуры из ненадежных элементов применением резервирования?
5. Какова роль культуры производства в обеспечении качества и надежности изготавливаемой аппаратуры?
6. В чем отличие оценки надежности по вероятности безотказной работы и по вероятности отказа на заданном интервале работы?
7. Как определяется кратность резервирования?
8. В каких случаях применение скользящего резервирования оправдано?
9. Какова роль надежности ПКИ при изготовлении аппаратуры?
10. Какими методами обеспечивается высокая культура производства?
11. Как, по Вашему мнению, предпочтительно сравнивать надежность вариантов повышения надежности (по отношению вероятностей безотказной работы или вероятностей отказа на заданном интервале работы)?

7. Принципы обеспечения и повышения надежности аппаратуры

В работах по созданию аппаратуры САУ можно выделить два состава тесно связанных работ:

1) Работы, которые выполняются с целью исключения каких-либо отказов в РЭА. Под отказом здесь будем понимать несоответствие объекта какой-либо норме ТУ. Введем термин «дефект», который означает, что в данном образце РЭА (модуле, блоке или приборе) есть какие-то несоответствия действующей КД, которая подразумевает, что все комплектующие полностью соответствуют нормам ТУ на них, выдержаны все требования технологических процессов изготовления [15].

2) Работы по обеспечению нейтрализации отказов, возникающих в эксплуатации.

Дефект — это локальное отклонение в каком-либо ЭРИ (например, БИС, дискретном компоненте — резисторе, конденсаторе, диоде и т. п.), приводящее к его неправильному функционированию.

Производственный дефект — это нарушение в связях между ЭРИ, вызванное, например, окислением некачественных паек выводов, нарушение целостности или замыкание цепей в печатных платах. Дефекты могут быть «заложены» в аппаратуру в процессе изготовления (установка дефектных ЭРИ, некачественный монтаж) и могут возникать или проявляться в процессе работы (так называемые скрытые дефекты, которые не выявляются в процессе приемо-сдаточных испытаний аппаратуры).

В дальнейшем, говоря о безотказности аппаратуры, будем иметь в виду, что проявления дефектов нет. Например, нару-

шение изоляции между проводниками печатной платы может вызывать появление токов утечки, но не приводит к нарушению функционирования объекта, хотя возникает так называемый «нережим» работы элементов в схеме электрической. Для аналоговой техники это приводит к нарушению точностных характеристик, так как дефект приводит к параметрическим отказам — «уходам». Для цифровой техники такое «замыкание» может и не приводить к заметным отклонениям в работе в силу наличия порогов, потому что сигнал имеет характер непрерывный, а дискретный, так как значения логических «0» и «1» разнесены на достаточно большую величину. Например, для КМОП интегральных микросхем эта разность порогов близка к напряжению в величине напряжения питания, в связи с чем небольшое отклонение уровня сигнала (на 10–15 % от идеального) при дефекте в печатной плате может остаться незамеченным при выполнении функций. В этом случае только «глухое» замыкание цепей может привести к функциональному отказу, хотя и здесь начинают сказываться величины выходных сопротивлений источников (передатчиков) сигналов и более сильный исправный источник может «передать» другой, более слабый дефектный. В этом случае работа не нарушится, т. е. возникает, казалось бы, парадоксальная ситуация — дефект есть, а отказа нет, хотя прибор, с точки зрения КД, неисправен, так как нарушены требования норм к сопротивлению изоляции печатных плат.

Введя нестрогое понятие дефекта в дальнейшем при обсуждении вопросов обеспечения надежности будем, в первую очередь, иметь в виду отсутствие фактических и потенциальных дефектов при выпуске аппаратуры с завода-изготовителя.

Под потенциальным будем понимать дефект, который не проявился при ПСИ, но может в дальнейшем привести к нарушению работоспособности объекта. Этот вид дефектов в промышленности известен как «непропай» или «холодная» пайка. С течением времени вследствие нарушения омического контакта из-за окисления или изменения структуры припоя (его

кристаллизации) может возникнуть потеря контакта — катастрофический отказ, т. е. грубое нарушение функционирования прибора (объекта).

Кроме того, причиной перехода потенциального дефекта в реальный на приведенном примере может быть не только фактор времени, но и механические воздействия (например, вибрация или удары). Из-за разных коэффициентов теплового расширения материалов повышение температуры также может привести к нарушению контакта и, следовательно, к потере связи, т. е. обрыву цепи.

Рассмотрим основные принципы обеспечения надежности, т. е. исключения дефектов любого вида при проведении ПСИ выпускаемой производством аппаратуры.

Рассматривая и анализируя дефекты, проявляющиеся на практике в аппаратуре САУ, можно выделить две основные группы причин наличия дефектов в РЭА:

- установка неисправных или потенциально дефектных ЭРИ;
- ошибки, допускаемые рабочими при монтаже в процессе производства (производственные дефекты).

Очевидно, что применение неисправных или потенциально дефектных ЭРИ также вызвано причинами производственного характера, только не на заводе-изготовителе РЭА, а на заводе-изготовителе ЭРИ.

Таким образом, вопросы организации работ на производстве являются крайне важными для всех этапов изготовления РЭА, начиная с этапа производства материалов для изготовления ЭРИ. Качество исходных материалов особенно важно при изготовлении полупроводниковых структур. Структурное совершенство и «чистота» исходного материала существенно определяют электрофизические свойства полупроводникового прибора (диода, транзистора) и его состояние во времени, особенно при воздействии ИИ.

Таким образом, шутка «начинать с копки руды» имеет серьезный практический смысл в микроэлектронике и прибо-

ростроении. Ранее уже частично отмечалась весомость разных факторов, представленных в виде пирамиды (рис. 6.1), в обеспечении надежности. Рассмотрим их повторно, имея в виду, что важным фактором в создании качественной аппаратуры САУ является уровень производства, как микроэлектронного, так и приборного.

В среде разработчиков аппаратуры для бортовых САУ есть шутка, что самым главным ограничением на создание функционально совершенной аппаратуры, например БУВК, с безграничными вычислительными ресурсами и высокой надежностью являются не ограничения на массу, габариты и энергопотребление РЭА, а ограничения, связанные с требованиями серийнопригодности для изготовления на современных заводах.

Рассмотрим повторно принципы пирамиды по приоритету.

Простота технических решений предполагает, что при разработке КД закладываются технические решения, которые могут быть реализованы в производстве на современном уровне техники. Простота технических решений предполагает, что КД ориентирована на максимальную автоматизацию процессов изготовления и контроля по возможности без участия (или с минимальным участием) человека в производственном процессе. Таким образом, КД должна быть ориентирована на конкретное производство.

Как правило, создание принципиально новых решений и внесение их в КД требует тщательной подготовки производства и его переоснащения, что реально не всегда можно сделать из-за финансовых и сроковых ограничений.

Применение надежных ЭРИ, поступающих от проверенных и известных поставщиков. При этом целесообразно ограничить как номенклатуру ЭРИ, так и количество поставщиков, что дает возможность по результатам применения вести планомерную работу по повышению качества ЭРИ.

Культура производства — это, в первую очередь, оснащенность технологическими линейками с максимальным уровнем автоматизации.

Отработка технических решений. Данная работа начинается с этапа создания ТЗ, в котором требования не должны быть занижены для совершенствования технического уровня САУ, но требования не должны быть чрезмерно высокими, чтобы обеспечить их реализуемость при современном уровне развития техники. В среде разработчиков говорят: «Существует два способа загубить на корню любую разработку — предъявить или чрезмерные, или заниженные требования». В результате выполнения таких требований ТЗ будет создано изделие с низкими техническими характеристиками.

Отработка технических решений активно ведется на этапе технических предложений с использованием математического и физического (макеты) моделирования. Макетирование является важной частью работ, так как на этом этапе легче проверить, например, нагрузочные режимы работы ЭРИ, которые существенным образом определяют надежность РЭА.

Для обеспечения качества важным является проведение полноценной проверки на опытных и экспериментальных образцах РЭА, а именно качественное проведение автономных и комплексных лабораторных испытаний (ЛОИа и ЛОИк) с необходимой коррекцией КД по результатам испытаний.

В процессе ЛОИа проверяются электрические режимы работы аппаратуры в различных климатических условиях (температура, влажность, атмосферное давление), а также устойчивость и прочность аппаратуры к воздействию механических нагрузок (вибрации, удары, акустика).

Самостоятельным видом являются испытания на радиационную стойкость, как подсистем, так и САУ в целом. Несмотря на дороговизну этих испытаний, радиационные отработочные испытания (РОИ) составляют важный этап во всем комплексе испытаний.

Обеспечение 100 %-го выпускного контроля аппаратуры, для чего для каждого уровня (ЭРИ, микромодули (узлы), блоки, модули) и, наконец, САУ в целом создается специальная контрольно-испытательная аппаратура (КИА).

Возвращаясь к началу пирамиды, отметим, что при выборе решений сразу закладывается «контролепригодность» на всех уровнях, и, если есть необходимость и возможность, в аппаратуру вносится избыточность (дополнительное оборудование) для контроля (в простейшем случае это могут быть технологические выходы (разъемы), на которые поступают сигналы с промежуточных связей соответствующего прибора). В объеме испытаний при ПСИ присутствуют не только проверки в нормальных условиях, но работа проверяется в расширенном диапазоне климатических и механических воздействий. Нормы выбираются таким образом, чтобы испытания не носили разрушающего характера. По этой причине при ПСИ не проводят прямых испытаний на радиационную стойкость и механические воздействия, выходящие за пределы механической прочности РЭА. Уровень прочности определяется при ЛОИа.

Для выявления скрытых (потенциальных) дефектов параметрического характера проводят испытания в диапазоне изменения температур и напряжений питания прибора.

Выпускные испытания делятся на два этапа:

- заводские, когда проверка идет в процессе производства на рабочих местах;
- предъявительские, когда приемку (испытания) ведет представитель отдела технического контроля (ОТК) или представитель заказчика (ПЗ).

Таким образом, испытания проходят в три стадии: заводские, приемо-сдаточные ОТК ($ПСИ_{\text{ОТК}}$) и приемо-сдаточные ПЗ ($ПСИ_{\text{ПЗ}}$).

Каждый прибор в качестве финальной операции ПСИ проходит проверку в составе комплекса аппаратуры САУ, для чего создаются специальные стенды со своей контрольно-испытательной аппаратурой ($КИА_{\text{САУ}}$).

По результатам выявления дефекта на любом этапе ПСИ проводится анализ причин возникновения дефекта и вырабатываются мероприятия, направленные на их устранение. Это может быть доработка КД, изменение техпроцессов сборки, обучение (переподготовка производственного персонала).

При повторяющихся дефектах какого-либо типа ЭРИ разрабатываются мероприятия по устранению дефектов, выявленных в данном типе ЭРИ (серии ЭРИ); при неэффективности мер по повышению качества ЭРИ может быть проведена радикальная переработка КД, направленная на замену данного типа ЭРИ за счет изменения схемы электрической или переход на аналог, выпускаемый другой фирмой (предприятием).

Как уже отмечалось, эти принципы являются основой обеспечения надежности. Учитывая существенное влияние температуры окружающей среды на параметры ЭРИ, при конструировании вводят меры по обеспечению теплоотвода от тепловыделяющих элементов, что особенно важно, например, для источников вторичного электропитания. Простейшим решением является пассивный теплоотвод, который обеспечивается введением массивных металлических оснований (радиаторов) для установки ЭРИ.

Учитывая отсутствие в невесомости конвекции для сброса тепла, необходимо обеспечить непрерывный тепловой контакт радиаторов с холодной массой, которой может быть металлическая плита, выходящая на теневую сторону КА (так называемый кондуктивный теплоотвод за счет соединений металлических деталей конструкции).

Кроме пассивного теплоотвода может быть активный. В простейшем случае это установка вентиляторов, создающих принудительную циркуляцию воздуха и перенос тепла от теплонагруженных узлов и блоков к более холодным, т. е. выравнивание температуры по всей массе приборов САУ и массе конструктивных (крепежных) элементов приборного отсека. В ряде аппаратуры вводят устройства охлаждения, основанные на эффекте Пелье, суть которого состоит в том, что на границе соединения двух металлов за счет контактной разности потенциалов возникает разделение на «холодные» с малой энергией и «теплые» носители заряда, причем последние при приложении разности потенциалов к концам металлов будут уноситься от места спая, вызывая его охлаждение. Этот метод широко используется в оптикоэлектронных приборах. Примером является установка фотоприемной

ПЗС-матрицы аппаратуры астронавигации на холодное основание. Без холодильника уровень шумов в ПЗС-приборах таков, что делает их практически неработоспособными.

Более радикальной и затратной является установка прямых холодильных установок (компрессоров с прокачкой охлаждающей жидкости, например 40 %-го водного раствора этилового спирта, через систему охлаждения и радиаторы).

Для некоторых узлов, например кварцевых задающих генераторов (КЗГ), не столько важна низкая температура, сколько ее стабильность. Поэтому КЗГ часто помещают в термостат, имеющий подогрев, периодическое включение которого обеспечивает поддержание температуры в узком диапазоне. Это позволяет получить требуемую точность счета реального времени или просто стабильность частоты, которая требуется для работы некоторых узлов приборов.

Кроме температурных комфортных условий надежная работа РЭА связана с нейтрализацией механических воздействий. В частности, для исключения влияния вибраций приборов к конструкции объекта их прикрепляют через амортизаторы.

Для защиты от внешних электромагнитных излучений вводят экранирование, для чего приборы помещают в металлический корпус. Как уже отмечалось, экраны можно вводить для защиты от ИИ, хотя последнее решение достаточно «дорого» по массе или объемам РЭА САУ и не всегда приемлемо, так как минимизация массы и габаритов РЭА для изделий РКТ является одним из базовых требований.

В связи с жесткими ограничениями на габаритно-массовые характеристики (ГМХ) РЭА введение внешних экранов всегда проблематично, поэтому принимают конструкторские решения на уровне блоков, которые делают с необходимым уровнем механической прочности, например печатные платы наклеивают на металлический корпус, что дополнительно обеспечивает отвод тепла от ЭРИ.

Таким образом, конструкторские решения играют важную роль в обеспечении надежной работы РЭА.

Для повышения устойчивости к внешним ЭМИ, кроме внешнего экранирования, разводку цепей на печатных платах и конструкцию кабелей связи выполняют таким образом, чтобы минимизировать эффект «приемной антенны» (например, отсутствие свободных, т. е. неподключенных к выходу передатчика (источника сигнала) цепей, установка фильтров в цепи, подверженные внешним наводкам).

Для обеспечения устойчивости к ИИ проводят тщательный выбор комплектующих ЭРИ (см. рис. 7.1) и материалов конструкции (особенно изолирующих), вводят так называемое «теневое» экранирование, когда более чувствительные приборы, например БУВК или БИНС, помещают в «тени» элементов конструкции массивных приборов. Примером таких экранирующих приборов являются химические источники тока (ХИТ), т. е. ампульная батарея, аккумуляторы.

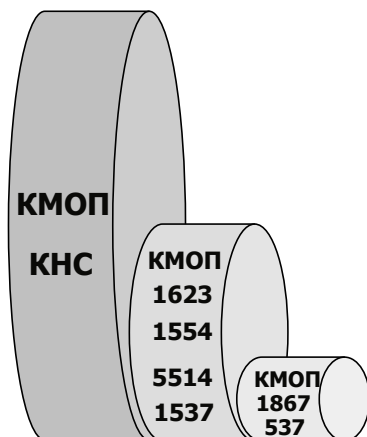


Рис. 7.1. Градация ЭРИ по уровням стойкости к ИИ

«Теневой» эффект может дать релейный коммутационный прибор, имеющий большую массу реле, устойчивых по своей природе к ИИ, особенно к импульсному.

От пассивных мер повышения надежности (снижение температуры, амортизация, экранирование) можно переходить

к структурным методам. На примере БУВК одной из САУ РН рассмотрим структурные методы повышения надежности. В первую очередь это резервирование. Структура многомашинного резервированного БУВК приведена на рис. 7.2.

В рассматриваемом БУВК к общей трехканальной магистрали подключены n вычислительных машин (ВМ). В начальный момент за каждой из ВМ закреплен определенный круг задач. Например, за ВМ1 — задачи стабилизации и расчет параметров движения по информации, поступающей с датчиков подсистемы инерциальной навигации. За ВМ2 и ВМ3 могут быть закреплены задачи обработки информации подсистемы спутниковой коррекции (ПСК), за ВМ4 и ВМ5 — задачи обработки информации подсистемы оптической коррекции. ВМ n — свободная машина, которая при отказе любой из ВМ с первой по пятую может взять на себя решение их задач.

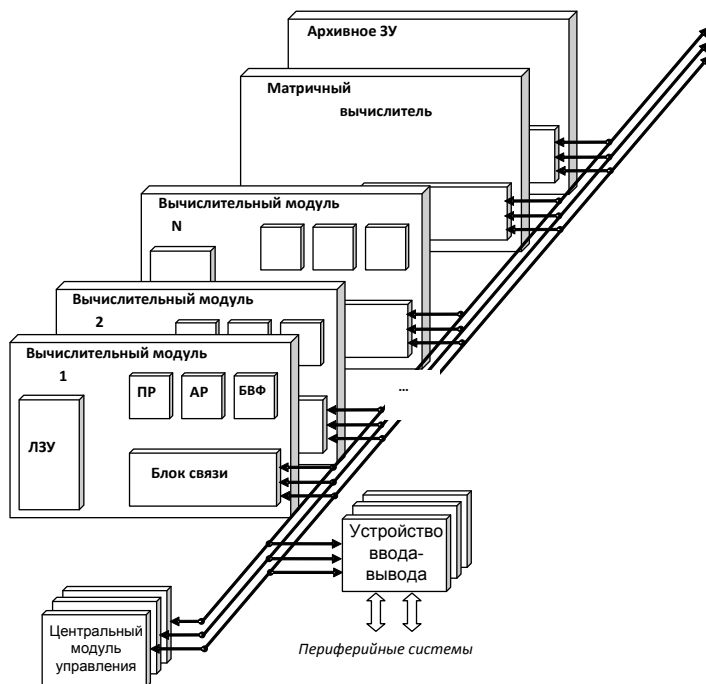


Рис. 7.2. Структура многомашинного магистрально-модульного УВК

В данном примере мы имеем случай ненагруженного скользящего резерва. Очевидно, что с точки зрения затрат обслуживания вариант системы со скользящим резервом предпочтительнее варианта с дублированием каждой из вычислительных машин (ВМ1, ВМ2, ВМ3, ВМ4 и ВМ5). Для обеспечения подключения резервной ВМ к решению задач отказавшей магистрали подключено общесистемное запоминающее устройство, в которое каждая из ВМ производит циклический «сброс» информации, необходимой для восстановления вычислительного процесса при подключении другой ВМ к решению данной задачи. Принцип формирования резервных массивов информации представлен на рис. 7.3.

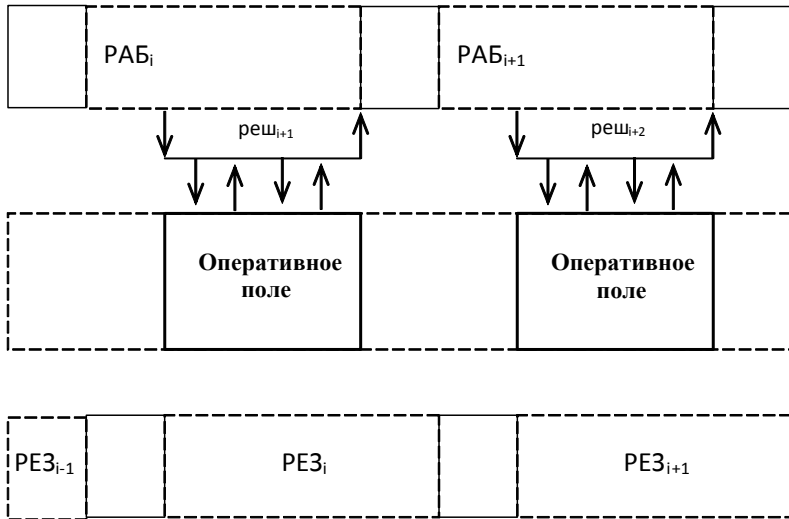


Рис. 7.3. Формирование резервных массивов информации

В магистрално-модульной структуре легко может быть реализовано горячее резервирование, для чего возможно объединение ВМ в тройки, которые синхронно решают одну и ту же задачу. Сравнивая циклическую информацию (результаты решения промежуточных задач) трех машин между собой, всегда

можно определить ВМ, дающую результат, отличающийся от результатов, рассчитанных двумя другими ВМ.

В этом случае результаты расчета отличающейся (неисправной) ВМ не используются, а берутся расчетные данные одной из двух исправных ВМ, а забракованная машина переводится в режим восстановления путем записи в ее память массивов из памяти правильно работающей.

Как отмечалось ранее, в такой структуре возможно перераспределение задач с назначением любой ВМ или в режим резервного счета с другими, или в режим решения самостоятельной задачи. Такой принцип резервирования требует тщательной совместной работы разработчиков алгоритмов управления, разработчиков УВК и программистов, создающих системные программы, организующие взаимодействие ВМ между собой, а также все обмены по магистрали, включая задачи контроля передачи данных. При таком подходе осуществляется переход от фиксированной структуры УВК к вычислительной системе, адаптивной к отказам и вычислительным перегрузкам.

Адаптация обеспечивается перераспределением вычислительных ресурсов операционной системой. Непосредственное решение задач перераспределения ресурсов в режиме управления изделием требует значительных (не менее 30%) затрат времени и неприемлемо для систем, работающих в реальном масштабе времени.

Для БВК, как правило, определен состав обязательных (основных) и дополнительных задач на каждом участке работы. Оптимальное распределение ресурсов может быть найдено заранее и введено в память ЭВМ как табличные данные для работы операционной системы.

При подготовке таблиц распределений в качестве критерия оптимальности использована целевая функция технической эффективности, представляющая собой вероятность выполнения задания системой управления и включающая характеристики как решаемых задач, так и надежности аппаратуры.

Если дополнительные задачи вносят аддитивный (по мере их добавления) вклад в общую вероятность выполнения задания системой, то функция технической эффективности $B(\vec{X})$ будет иметь вид: запоминающее устройство информации из правильно работающей машины.

Для решения задачи оптимального распределения ресурсов в процессе полета необходимо решать задачу максимизации функции технической эффективности:

$$B(\vec{X}) = B_0(x_0) \left(1 + \sum_{i=1}^k \eta_i P_i(x_i) \right),$$

где $\vec{X} = (x_0, x_1, \dots, x_k)$ — вектор распределения машин по задачам; $B_0(x_0)$ — вероятность выполнения задания при решении основных задач;

x_0 — количество машин, решающих основные задачи;

x_i — количество машин, решающих i -ю задачу;

η_i — вклад i -ой задачи в общую вероятность выполнения задания, т. е. весомость задачи;

$P_i(x_i)$ — вероятность безотказной работы группы вычислительных машин;

k — количество дополнительных задач.

Оптимальным будет распределение X^* , для которого

$$B(\vec{X}^*) = \max_{\sum_{i=0}^k x_i \leq N} B(\vec{X})$$

Здесь N — количество вычислительных машин, которые могут быть установлены без нарушения ограничений на массу и габариты аппаратуры.

Данная задача может быть решена градиентными методами, недостатком которых является необходимость проверки результата на то, что найден глобальный максимум. Рассмотрим модификацию метода динамического программирования, применение которого исключает получение локальных максимумов.

Нахождение оптимального распределения необходимо для дополнительных задач, так как основные задачи (управление и стабилизация) могут быть представлены как одна обобщенная. При поиске оптимума методом динамического программирования требуется получить рекуррентное соотношение. С этой целью формулировка задачи оптимизации представлена в виде:

$$\max_{\sum_{i=0}^k x_i \leq N} B(x_0, \dots, x_k) = \max_{\sum_{i=0}^k x_i \leq N} \sum_{i=0}^k \eta_i P_i(x_i).$$

Для рассматриваемого случая

$$\begin{aligned} \max_{\sum_{i=0}^k x_i \leq N} \sum_{i=0}^k \eta_i P_i(x_i) &= \max_{x_k=0,1,2,\dots,N} \left\{ \max_{\sum_{i=0}^k x_i \leq N-x_k} B(x_i) \right\} = \\ &= \max_{x_k=0,1,2,\dots,N} \{ \eta_k P_k(x_k) + \max_{\sum_{i=0}^k x_i \leq N-x_k} \sum_{i=0}^k \eta_i P_i(x_i) \}. \end{aligned}$$

Введем функцию:

$$f_l(N) = \max_{x_k=0,1,2,\dots,N} \sum_{i=0}^l \eta_i P_i(x_i),$$

тогда это соотношение можно переписать в виде:

$$f_k(N) = \max_{x_k=0,1,2,\dots,N} \{ \eta_k P_k(x_k) + f_{k-1}(N - x_k) \}$$

Полученная формула является рекуррентной и позволяет найти оптимальное распределение вычислительных ресурсов методом динамического программирования.

Особенностью предложенного метода является то, что решаться могут не все задачи. Часть задач, имеющих меньшие вероятности, может быть не поставлена на решение. Все задачи можно упорядочить в соответствии с их весомостями: $\eta_1 \geq \eta_2 \geq \eta_3 \geq \dots \geq \eta_k$.

Так как величины η_i являются независимыми, то любые две задачи можно заменить эквивалентной. Для распределения

ресурсов в процессе работы можно использовать модификацию метода динамического программирования [13], которая позволяет последовательно, по шагам, снижать размерность. Объединяя две любые задачи на первом шаге можно сократить число задач от k до $(k - 1)$, на втором — до $(k - 2)$ и т. д. При упорядоченных весомостях $\eta_i \geq \eta_{i+1}$ объединение целесообразно начинать с младших номеров.

Алгоритм поиска оптимального распределения следующий.

1. Для первой и второй задач строится матрица эквивалентных эффективностей $B_1(x_1, x_2) = \eta_1 P_1(x_1) + \eta_2 P_2(x_2) = \eta^* P^*(x_1 + x_2)$. Элементы матрицы $B_1(x_1, x_2)$ являются композицией весомостей этих задач вероятностей безотказной работы групп ВМ, обеспечивающих их решение, по всем возможным значениям x_1 и x_2 при $x_1 + x_2 \leq N$. Получаем матрицу значений $B_1(x_1 + x_2)$. Введем обозначение: $k_1 = x_1 + x_2$.

2. В полученной матрице выбирается доминирующая последовательность из всех возможных значений $E_1(k_1)$ и составляется вектор $B_1^*(k_1)$ для $k_1 = 1, 2, \dots, N$.

3. Строится матрица значений для второй эквивалентной задачи η_2^* , которая образуется компонентой третьей задачи η_3 и первой эквивалентной задачи η_1^* . Элементами матрицы будут значения $\eta_2^* P(k_2)$, где $k_2 = k_1 + x_3$.

4. В полученной матрице выбирается доминирующая последовательность для $k_2 = 1, 2, \dots, N$.

5. Процесс продолжается до включения последней задачи или до момента, когда включение новой задачи практически не дает приращения технической эффективности.

Полученные расчетами на инструментальных ЭВМ с использованием имитационного моделирования для расчета оценок вероятностей безотказной работы аппаратуры ($P(x)$) оптимальные распределения вводятся в память БЦВС в виде таблиц, с которыми в основном режиме работает бортовая операционная система.

Для организации обмена с внешними подсистемами по ГОСТ 52070–2003 в состав БУВК введены модули каналов обмена. Эти модули, в отличие от ВМ, дублированы для каждого направления, т. е. для каждой подсистемы. Дублирование каналов обмена достаточно для демпфирования возникновения неисправности в рабочем модуле, отказы в работе канала обмена достаточно просто обнаруживаются как факт непрохождения обмена с периферийной подсистемой. При обмене массивами по магистрали может быть организован высокоэффективный контроль правильности передачи — все массивы, приготовленные к передаче, охватываются контрольной суммой (K_{Σ}), рассчитанной по двойной шкале относительно разрядности передаваемых слов. Так, например, при передаче 16-разрядных слов сумма записывается как 32-разрядное слово, т. е. два 16-разрядных, которые присоединены к передаваемому массиву и расположены строго в определенном месте, например два первых или два последних слова.

В случае нарушения логики обмена или искажения данных, обнаруженных по K_{Σ} , данное взаимодействие (обмен) повторяется каналом обмена. В случае повторения ошибки к взаимодействию подключают второй (резервный) канал обмена. Дублирование в данном случае оправдано, так как дает незначительное увеличение оборудования в силу того, что контроль осуществляется не аппаратурными, а программными средствами: канал обмена — вполне «интеллектуальное» вычислительное устройство, содержащее собственный процессор с памятью программ и данных.

В качестве примера повышения надежности рассмотрим резервирование релейных команд, выдаваемых УВК. Пусть, например, требуется создать цепь передачи (связи) шины A и B . Подключение шины A к шине B может потребоваться, например, при подаче питания на какое-то устройство от источника питания, выход которого является шиной A , а вход питания устройства — шиной B , если поставить реле, которое замыканием своего контакта K_1 подключит питание от шины A ко входу шины B (рис. 7.4).

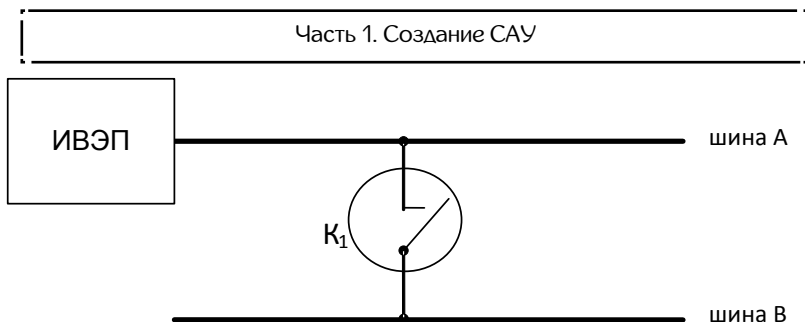


Рис. 7.4. Пример коммутации шины питания

В случае отказа такого реле команда на включение питания не выполнится, и устройство останется обесточенным, т. е. неработоспособным. В результате этого будет неработоспособна САУ в целом.

В таких случаях прибегают к резервированию реле и их контактов по принципу 2 из 3-х, что предполагает установку дополнительно к рабочему двух резервных, причем контакты соединяют таким образом, что исключается ложное срабатывание. Для этого делают три параллельных цепи, в каждой из которых последовательно соединены контакты двух разных реле, т. е. образуются пары трех реле (P1, P2, P3) следующим образом (рис. 7.5).

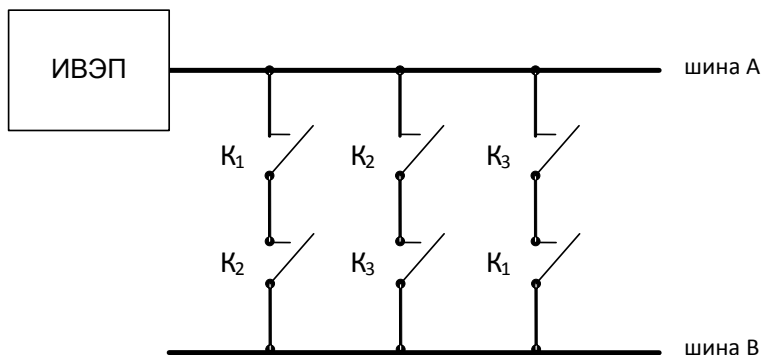


Рис. 7.5. Пример трехканального резервирования реле с организацией выборки 2 из 3-х на контактах реле

Описанный принцип хорошо зарекомендовал себя на практике, так как обеспечивается достаточно надежное подключение, есть три параллельные цепи и в то же время исключено ложное срабатывание при ошибке в работе одного из реле, которая вполне может возникнуть при механических воздействиях.

Если на контактах реле принцип мажоритации (т. е. выбора большинства, например, 2 из 3-х) решается относительно просто, то резервирование вычислительных машин таким способом представляет определенные трудности. Тем не менее, первые УВК до середины 60-х годов строились именно по этому принципу, для чего устанавливались три синхронно и синфазно работающие вычислительные машины. Причем необходимость именно синхронности и синфазности создавала серьезные проблемы, так как требовался единый задающий генератор — источник формирования синхросигналов (тактирующих синхроимпульсов). Естественно, что отказ такого задающего генератора делал неработоспособным УВК в целом. Эта серьезная техническая задача была решена достаточно удачно к началу 70-х годов (в 1968—1969 гг.).

При установке трех вычислительных машин их выходная информация, передаваемая на ЦАП и далее на исполнительные устройства объекта управления, подвергалась мажоритации, для чего в состав УВК вводится специальный узел — задающий генератор (ЗГ), обеспечивающий синхронную и синфазную работу каналов резерва. Слабым местом такой структуры (рис. 7.6) является не только генератор, но и узел мажоритации (УМ), на выходе которого собираются сигналы трех независимых цифровых вычислительных машин (ЦВМ), что может приводить к взаимной блокировке при определенных видах неисправностей в УМ.

Несмотря на значительную (двукратную) избыточность (необходимо вместо одной ЦВМ ставить три и вводить общее оборудование — ЗГ и УМ), такой вид резервирования был достаточно распространен в САУ изделиями РКТ, так как обеспечивал

принцип сохранения работоспособности САУ при возникновении одной неисправности в вычислительной машине.

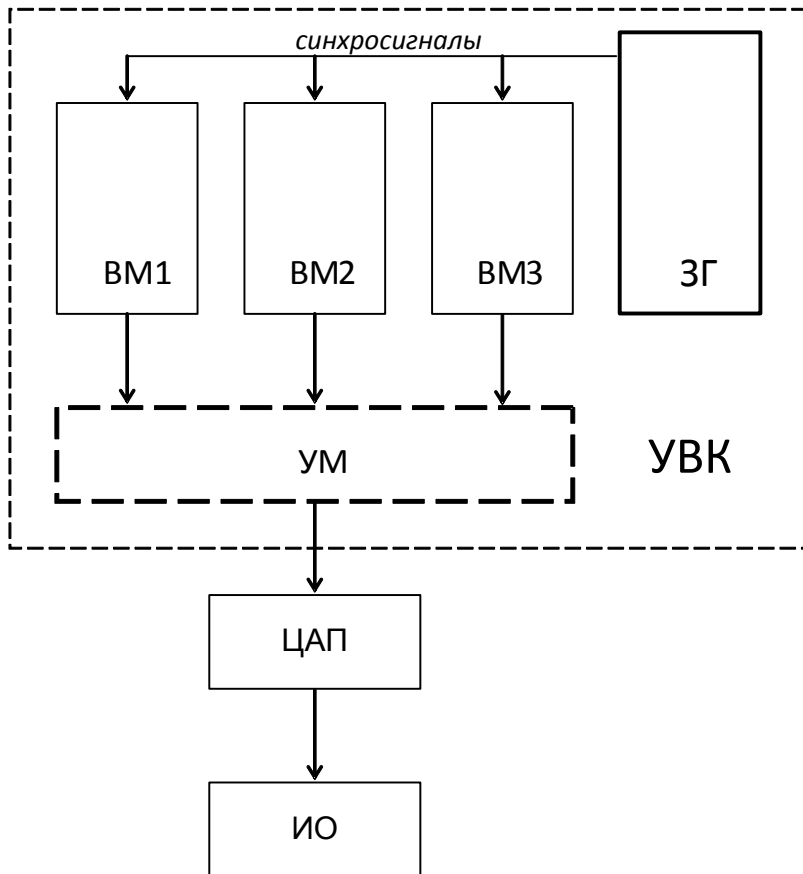


Рис. 7.6. Структура резервированного БУВК
с мажоритацией выходных сигналов вычислительных машин

Очевидно, что в такой структуре после возникновения первой неисправности в одной из ЦВМ любая неисправность в любой из двух оставшихся ЦВМ приводила к отказу БУВК, так как после возникновения первой неисправности вероят-

ность второго отказа становилась не независимой, а возрастала потому, что отказ мог возникнуть в **любой** из двух ЦВМ, а это по сравнению с интенсивностью отказов одной ЦВМ приводило к возрастанию интенсивности отказа в 2 раза.

По мере получения опыта работы со структурами с выборкой «2 из 3-х» был сделан следующий шаг по совершенствованию резервирования БУВК, а именно переход в трехканальной структуре от системы с узлом мажоритации к системе с переключением каналов (ПК) по результатам контроля выходной информации схемой сравнения (СС). Структура такой системы представлена на рис. 7.7.

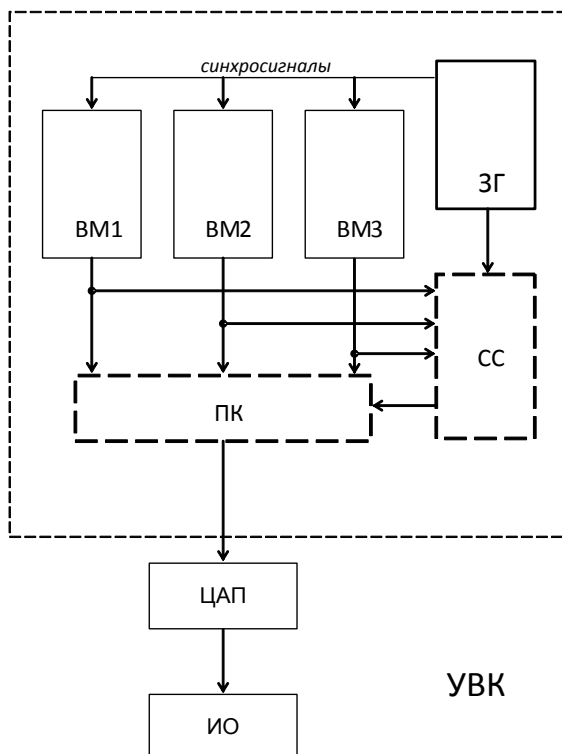


Рис. 7.7. Структура троированного УВК с переключением выходной информации ВМ по результатам контроля схемой сравнения

Введем обозначения машин по кольцу следующим образом: при отказе ВМ1 к выходу подключается ВМ2; при отказе ВМ2 подключается ВМ3; при отказе ВМ3 подключается ВМ1. Условно порядок переключения показан на рис. 7.8.

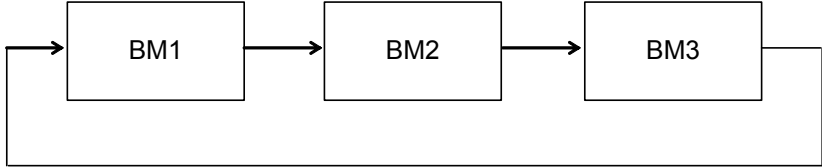


Рис. 7.8. Порядок переключения резерва ВМ

Обозначим ВМ1 через $ВМ_i$, тогда ВМ2 — $ВМ_{i+1}$, а ВМ3 — $ВМ_{i-1}$, т. е. при присвоении индекса i любой ВМ предыдущая по кольцу будет $ВМ_{i-1}$, последующая по кольцу переключения — $ВМ_{i+1}$. При обозначении выходной информации ВМ через U_i , U_{i+1} , U_{i-1} запишем в терминах булевой логики описание работы УМ:

$$U_{\text{Вых. УМ}} = [(U_{i-1} \wedge U_i) \vee (U_i \wedge U_{i+1}) \vee (U_{i+1} \wedge U_{i-1})] \vee \\ \vee [\overline{(\bar{U}_{i-1} \vee \bar{U}_i)} \vee \overline{(\bar{U}_i \vee \bar{U}_{i+1})} \vee \overline{(\bar{U}_{i+1} \vee \bar{U}_{i-1})}],$$

где U_i — выходная информация ВМ_{*i*};

\bar{U}_i — инверсная выходная информация ВМ_{*i*};

$U_{\text{Вых. УМ}}$ — выходная информация УВК после блока мажоритарной выборки (узла мажоритации);

\wedge — логическое «И», \vee — логическое «ИЛИ».

Приведем логическую формулу схемы сравнения, вырабатывающей сигнал неисправности i -ой ВМ при несовпадении ее информации с двумя другими. Обозначим сигнал неисправности ВМ_{*i*} через H_i , тогда

$$H_i = [(U_{i+1} \wedge U_{i-1}) \vee \bar{U}_i] \vee [\overline{(\bar{U}_{i+1} \vee \bar{U}_{i-1})} \vee \bar{U}_i].$$

Выявить вторую отказавшую ВМ в этом случае нельзя, так как нет критерия достоверности, а именно — совпадения сигналов двух ВМ, хотя сам факт возникновения отказа в одной из двух оставшихся исправными ВМ может быть зафиксирован, но его нельзя использовать, так как нет диагностики с точностью до ВМ. В этом случае для диагностики второй отказавшей ВМ необходимы дополнительные критерии, например встроенные средства аппаратурного, оперативного контроля (СОК) или программно-логического контроля (например, сторожевой таймер). Очевидно, что отказ первой отказавшей ВМ диагностируется с вероятностью, практически равной «1», если не учитывать самой схемы сравнения, чем обычно пренебрегают в связи с малыми аппаратурными затратами на ее реализацию по сравнению с оборудованием ВМ. На практике эти затраты не превышают 10 % от аппаратуры ВМ.

Всегда возникает вопрос, есть ли необходимость переключаться на один канал в мажоритируемой структуре после появления первой неисправности, т. е. что выгоднее — оставить мажоритацию при наличии неисправности в одной из ВМ или провести переключение. Для принятия решения по выбору варианта резервирования целесообразно провести сравнение надежности этих вариантов по их вероятности безотказной работы (ВБР) на оставшемся интервале времени работы. Сравнение ВБР целесообразно заменить на сравнение вероятностей отказа, что предпочтительнее, так как можно просчитать, во сколько раз одна вероятность отказа больше (меньше) другой, что при сравнении с ВБР не будет таким наглядным, так как оба значения ВБР на практике близки к «1». Поэтому целесообразно вести сравнение через отношение вероятностей отказов.

На практике возникает вопрос, как сравнивать оценки надежности вариантов резервирования, если достоверные значения интенсивности отказов будут известны только по результатам эксплуатации, а решение необходимо принять на этапе разработки. Таким образом, возникает задача принятия решения в условиях неопределенности относительно интен-

сивности отказов $\lambda(t)$. Обозначим суммарную интенсивность отказов УВК (т. е. всех ВМ и всех средств управления резервом (МЭ, ПК, СОК и т. д.)) через $L_0 = \sum \lambda_i(t)$, где $\lambda_i(t)$ — интенсивность отказов i -го модуля (ВМ, или МЭ, или ПК, или СОК и т. д.).

Приведем формулу для расчета ББР мажоритированной структуры при отказе одной из ВМ. Обозначим вероятность возникновения отказа УВК в целом через $Q_{\text{УВК}}(t)$, вероятности отказа одной ВМ — $q_{\text{ВМ}}(t)$, тогда

$$Q_{\text{УВК}}(t) = 1 - P(t),$$

$$q_{\text{ВМ}}(t) = 1 - p(t),$$

где $P(t)$ — вероятность безотказной работы УВК в целом до момента t ;

$p(t)$ — вероятность безотказной работы одной ВМ до момента t .

Для трех ВМ, подключенных к выходу через мажоритар, вероятность безотказной работы до момента t будет $P(t) = p^3 + 3p^2q$, соответственно $Q(t) = q^3 + 3q^2p$, т. е. система работает правильно, если исправны все три ВМ, что отражается компонентом p^3 ; система работает правильно, если отказала одна любая ВМ, а две остальные исправны, что отображает компонент $3p^2q$.

После возникновения отказа в одной из ВМ вероятность отказа системы при дальнейшей работе в оставшемся интервале τ резко возрастает. Вероятность отказа в интервале τ можно записать в виде $Q(\tau) = 2 \cdot q(t)$, т. е. отказ любой из двух оставшихся исправными ВМ на момент t в интервале τ приведет к отказу системы в целом. Мажоритированная система достаточно устойчива к одному отказу в интервале t , если на момент начала работы исправны все элементы, т. е. все три ВМ.

Если к моменту начала работы есть хоть одна неисправная ВМ, надежность системы на рабочем интервале невысока, так как вероятность того, что отказ возникнет в любой одной из двух исправных ВМ в два раза выше, чем вероятность отказа одной из ВМ.

Эта ситуация привела к созданию системы с переключением каналов перед началом работы, если обнаруживался отказ в одной из ВМ, так как в работу целесообразно отправить систему, где к выходу подключена одна исправная ВМ, а две другие не используются. Если отказ перед стартом в одной из ВМ обнаруживался с помощью средств КИА, которая проводит проверки САУ в целом и УВК в частности, то по командам КИА проводится переключение на исправную ВМ. Структура УВК с переключением каналов резерва ВМ приняла вид, представленный на рис. 7.9.

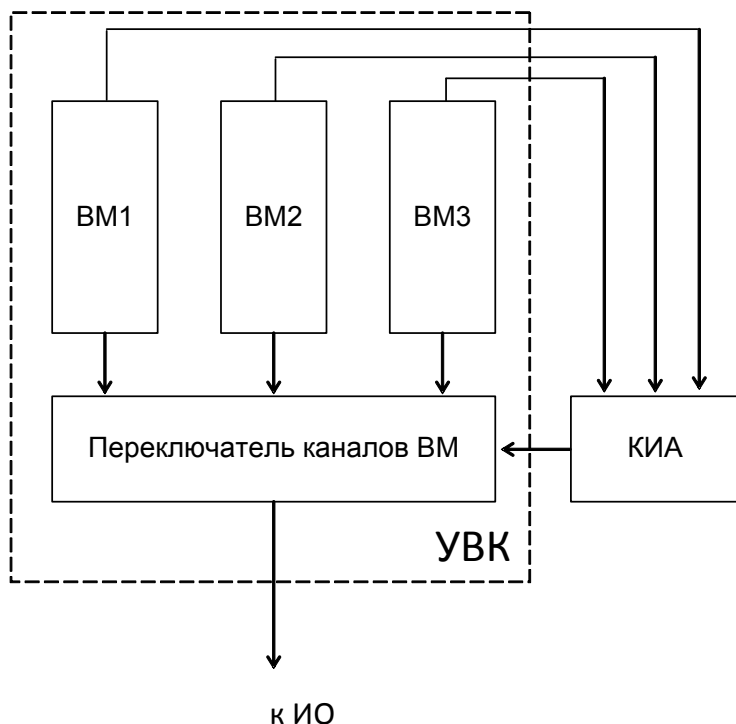


Рис. 7.9. Структура трехканального УВК
с переключением каналов по сигналам, поступающим из КИА

Введение переключения при наличии одной неисправной ВМ перед стартом позволило практически вдвое снизить вероятность отказа УВК в полете по сравнению с мажоритированной системой.

Введение переключателя каналов (ПК) резерва ВМ в состав УВК выдвинуло очередную задачу. Как использовать введенную избыточность в виде ПК для повышения надежности УВК в полете при старте в мажоритированном варианте, т. е. в том случае, когда к моменту старта все три ВМ исправны и структура с мажоритаром может работать достаточно эффективно.

Возникает вопрос, как перейти после возникновения первого отказа (отказа в одной из трех ВМ) от мажоритированной структуры к структуре с ПК. Для решения этой задачи необходимо оперативно в процессе полета выявить отказавшую ВМ и выработать команду на ПК для подключения к выходу одной из двух исправных ВМ, т. е. дополнительно к ПК требуется ввести еще избыточность в виде средств оперативного контроля (СОК), дающих команду на переключение ВМ в процессе основной работы УВК. Задачу контроля можно решить, сравнивая информацию трех ВМ между собой, и считать отличающуюся по выходной информации ВМ неисправной, если информация двух других совпадает.

Структурная схема УВК с ПК и СОК приведена на рис. 7.10.

БУВК с переключением каналов ВМ по сигналам СОК в простейшем случае строится на основе схем сравнения выходной информации всех машин между собой. Бракуется ВМ, у которой хотя бы в одном разряде выходная информация не совпадает с информацией двух других ВМ.

Если выдача информации на ИО идет в последовательном коде, то схема контроля по затратам оборудования будет невелика.

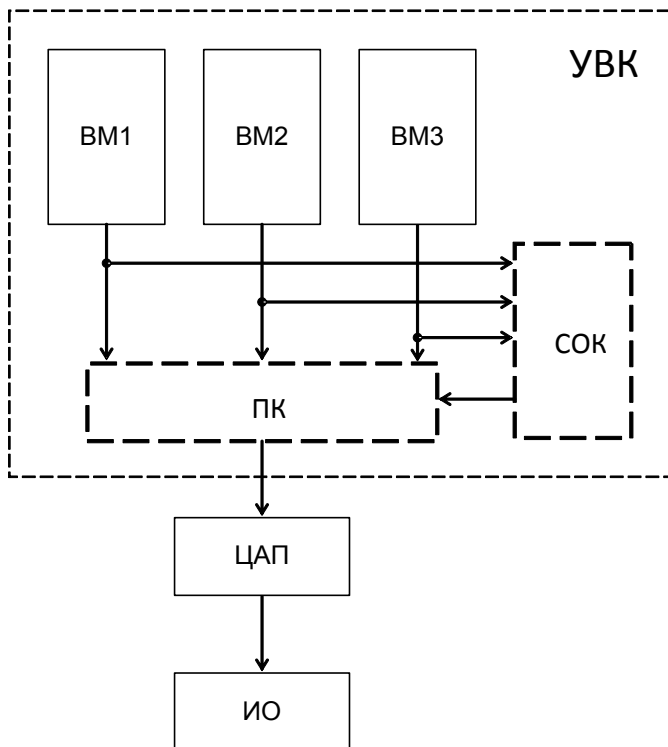


Рис. 7.10. Структура УВК с переключением каналов ВМ по сигналам системы оперативного контроля

8. Методы оценки надежности и выбора вариантов реализации в условиях неопределенности

Методика исследования вариантов и выбора оптимального методом имитационного моделирования

В виду сложной архитектуры УВК с изменяемой в процессе работы структурой аналитические и, в частности, асимптотические методы расчета показателей надежности применить затруднительно. Особенно сложны оценки аналитическими методами систем с восстановлением после случайных сбоев в работе, а также сбоев, вызванных направленным противодействием.

Решение вопроса о выборе оптимального варианта архитектуры УВК осложняется тем, что выбор должен приниматься в условиях неопределенности относительно реальной (эксплуатационной) интенсивности отказов элементов системы, с учетом длительного этапа хранения, в результате которого меняется суммарная интенсивность отказов. Направленные противодействия также достаточно неопределенны по моментам и последствиям воздействия.

Разработана методика, на базе которой возможна оценка надежности и выбор оптимального варианта УВК методом имитационного моделирования [16].

Методика охватывает несколько этапов. Схема исследования вариантов реализации показана на рис. 8.1.

На первом этапе исследования производится анализ функционального состава и структуры варианта УВК, режимов

функционирования системы, приведение информации к виду, пригодному для дальнейшего использования.

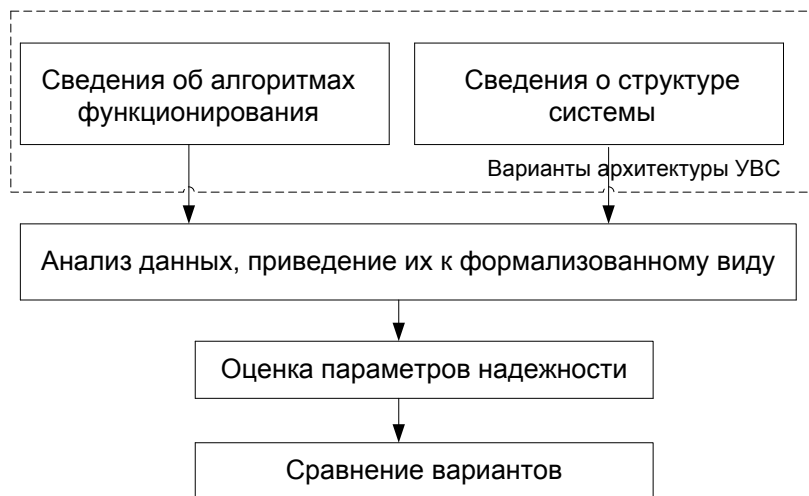


Рис. 8.1. Схема методики исследования

На втором этапе исследования производится оценка вероятности отказа исследуемого варианта системы методом статистического моделирования. Многократно моделируется работа системы и находится вероятность отказа системы в каждом испытании. Если Q_l — вероятность отказа системы в l -м испытании, а N — число испытаний, то вероятность отказа системы рассчитывается по формуле:

$$\bar{Q} = (\sum_{l=1}^N Q_l) / N.$$

Среднеквадратическое отклонение вероятности отказа системы находится по формуле:

$$\sigma_Q = \sqrt{(\sum_{l=1}^N Q_l^2) / N - \bar{Q}^2}.$$

В качестве критерия сравнения надежности вариантов целесообразно использовать отношение вероятностей отказа в заданном интервале работы, что обусловлено тем, что вероятность безотказной работы или однозначно связанная с ней вероятность отказа системы в заданном интервале времени является основной надежностной характеристикой УВС, задаваемой в техническом задании. Переход к относительным оценкам (отношению вероятностей отказов вариантов систем) позволяет исключить ошибки, связанные с недостоверностью знаний об абсолютных значениях интенсивностей отказов, продолжительности интервала времени работы, и позволяет выбрать область предпочтения вариантов при изменении остальных параметров систем. Решение, принятое по данному критерию, устойчиво к изменению интенсивности отказов в реально возможных диапазонах интенсивностей отказов элементов.

Формализованное описание варианта УВК зависит от степени его декомпозиции. В общем случае система состоит из n элементов: A_1, A_2, \dots, A_n , каждый i -ый элемент ($\forall i \in 1, n$) характеризуется следующими параметрами:

- λ_i — интенсивность отказа элемента в интервале работы $[0, T_{\text{раб}}]$, где $T_{\text{раб}}$ — время функционирования системы;
- z_i — признак работоспособности элемента: значение 0 соответствует отказу элемента, 1 — его исправности.

Также система характеризуется следующими параметрами:

- q — вероятность возникновения отказа хотя бы одного элемента системы на оставшемся интервале работы;
- τ — момент времени возникновения отказа хотя бы одного элемента системы на оставшемся интервале работы.

Интенсивности отказов элементов системы являются входными параметрами модели, остальные параметры модели вычисляются в процессе проведения эксперимента.

Формализации подлежат не все алгоритмы функционирования системы, а только логика ее работы в части возникнове-

ния отказов ее элементов. Например, формализации подлежат следующие алгоритмы функционирования: в случае отказа вычислительного модуля резервный модуль восстанавливает его работоспособность с определенной вероятностью β на любом этапе работы всей системы. Возможно рассмотреть варианты, когда отказ одного элемента системы приводит к невозможности работы других элементов системы.

Модель содержит следующие функции и процедуры:

– $s(A_1, A_2, \dots, A_n, T)$ — процедура изменения параметров модели в зависимости от текущего состояния элементов системы и оставшегося времени работы T . Изменению для исследования подлежат только параметры z_i в соответствии с логикой работы системы ($\forall i \in 1, n$);

– $time(A_1, A_2, \dots, A_n, T)$ — функция возвращает время, необходимое для совершения изменений в системе, которые будут сделаны функцией s при тех же значениях входных параметров (время реакции системы на отказ элемента);

– $r(A_1, A_2, \dots, A_n)$ — функция регистрации отказа системы: возвращает 1, если происходит отказ всей системы, иначе — 0.

Время безотказной работы каждого элемента системы в силу большого количества входящих в него компонентов подчиняется экспоненциальному закону распределения, поэтому вероятность того, что в системе произойдет отказ хотя бы одного элемента на основном интервале работы можно находить по формуле:

$$q = 1 - \exp\left(-\sum_{i=1}^n \lambda_i \cdot T_{\text{раб}} \cdot z_i\right).$$

Момент возникновения отказа хотя бы одного элемента системы может быть вычислен по формуле:

$$\tau = -\ln(\xi \cdot q + (1 - q)) / \left(\sum_{i=1}^n \lambda_i \cdot T_{\text{раб}} \cdot z_i\right),$$

где ξ — равномерно распределенное число в интервале от 0 до 1.

Итак, для получения оценки надежности в процессе имитационного моделирования система рассматривается как единое

целое в интервале работы $[0, T_{\text{раб}}]$ и обязательно переводится при моделировании в нерабочее состояние на этом интервале. При этом учитывается, что в процессе ее работы возможно возникновение двух типов событий: отказ какого-то элемента и реакция системы на этот отказ (совершение изменений, например, восстановления после сбоя согласно функции s).

Вероятность отказа системы в l -м испытании Q_l находится согласно следующему алгоритму.

1. Положить:

$$Q_l = 1, \theta = \infty, T = T_{\text{раб}},$$

где T — оставшееся время работы системы, θ — время возникновения изменений в системе.

Для $\forall i \in \overline{1, n}$ положить $z_i = 1$.

2. Положить:

$$q = 1 - \exp\left(-\sum_{i=1}^n \lambda_i \cdot T \cdot z_i\right),$$

$$\tau = -\ln(\xi \cdot q + (1 - q)) / \left(\sum_{i=1}^n \lambda_i \cdot T \cdot z_i\right),$$

где ξ — равномерно распределенные и независимые числа в интервале от 0 до 1.

3. Рассчитать $t = \min(\tau, \theta)$ — время возникновения очередного события в системе.

Если $t = \theta$, произвести изменения в системе, вызвав процедуру $s(A_1, A_2, \dots, A_n, T)$. Рассчитать вероятность того, что за время θ не было отказа в системе по формуле: $p = \exp(-\sum_{i=1}^n \lambda_i \cdot \theta \cdot z_i)$. Пересчитать: $Q_l = Q_l \cdot p$. Рассчитать оставшийся интервал работы: $T = T - t$. Рассчитать время реакции УВС на отказы элементов системы: $\theta = \text{time}(A_1, A_2, \dots, A_n, T)$. Перейти на п. 4.

Если $t = \tau$ — происходит отказ хотя бы одного элемента системы. Найти статистическое место отказа — j -й элемент системы. Для всех отказавших элементов положить $z_j = 0$. Пересчитать: $Q_l = Q_l \cdot q$. Рассчитать оставшийся интервал работы: $T = T - t$. Рассчитать время реакции УВС на отказ: $\theta = \text{time}(A_1, A_2, \dots, A_n, T)$.

4. Если $\theta = 0$, произвести изменения в системе, вызвав процедуру $s(A_1, A_2, \dots, A_n, T)$. Рассчитать время реакции УВС на отказы элементов системы: $\theta = \text{time}(A_1, A_2, \dots, A_n, T)$.

5. Если $\theta = 0$, перейти на п. 4.

6. Вызвать функцию регистрации отказа системы: если $r(A_1, A_2, \dots, A_n) = 1$ или T близко к нулю, стоп — вероятность отказа найдена. Иначе — перейти на п. 2.

Возникновение события с вероятностью β может быть промоделировано следующим алгоритмом:

1. Сгенерировать ξ — случайное равномерно распределенное число в интервале от 0 до 1.

2. Если $\xi < \beta$, событие происходит, иначе — событие не происходит.

Статистическое место отказа определяется согласно следующему алгоритму:

1. Сгенерировать ξ — случайное равномерно распределенное число в интервале от 0 до 1.

2. Определить $\lambda = \xi \cdot \left(\sum_{i=1}^n \lambda_i \cdot z_i \right)$. Положить $k = 1$.

3. Если $z_k = 0$, перейти на п. 5.

4. Если $\lambda \leq \sum_{i=1}^k (\lambda_i \cdot z_i)$, стоп: статическое место отказа —

элемент с номером k .

5. Положить $k = k + 1$.

Независимые случайные величины, имеющие равномерное распределение на интервале $[0, 1]$ могут быть получены с помощью генераторов случайных чисел [17].

В качестве примера проведем сравнительную оценку надежности двух вариантов УВК, включающих пять вычислительных модулей (ВМ), два из которых (ПСК) используются только для решения задач по обработке информации подсистемы спутниковой коррекции; во втором варианте предусмотрено включение в УВК четырех вычислителей, которые могут использоваться для решения всех задач, в том числе задач спутниковой коррекции.

Первый УВК (рис. 8.2) состоит из трех параллельно соединенных блоков ВМ1, ВМ2, ВМ3 и двух блоков ПСК1 и ПСК2. Интенсивность отказов блоков одинакова и равна L . Этот УВК отказывает, если неправильно работают все блоки ВМ1–ВМ3 до времени T (момент завершения основной задачи) или если отказывают оба блока ПСК1 и ПСК2 до времени T_c (момента завершения обработки информации канала спутниковой навигации).

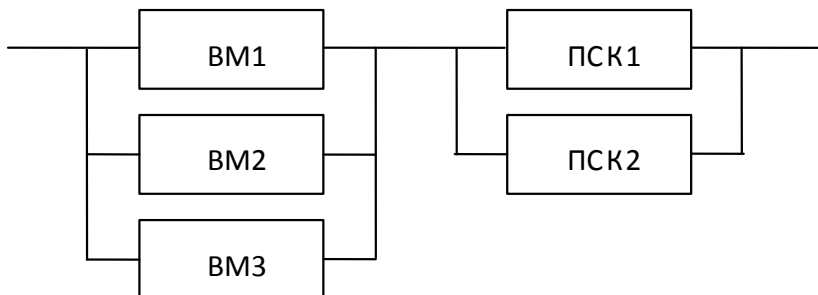


Рис. 8.2. Структурная схема определения надежности УВК

Во втором варианте построения УВК он отказывает, если неправильно работают все четыре блока до момента времени T или если отказывают два блока, решающие основные вычислительные задачи, и один блок спутниковой навигации до момента времени T_c .

Сравнительная оценка надежности систем проведена с использованием аналитического расчета и методов имитационного моделирования на интервале работы систем T .

Аналитический расчет надежности для УВК с пятью ВМ
Структурная схема для определения надежности УВК с пятью ВМ представлена на рис. 8.2.

Время возникновения отказов каждого блока подчиняется экспоненциальному закону распределения. Вероятность безотказной работы $P(t)$:

$$P(t) = e^{-\lambda t},$$

где λ — интенсивность отказов.

Вероятность отказа $Q(t)$:

$$Q(t) = 1 - P(t) = 1 - e^{-\lambda t}.$$

При параллельном соединении элементов система отказывает при отказе всех элементов:

$$Q_C(t) = \prod Q_i(t),$$

где $Q_i(t)$ — вероятность отказа i -го элемента.

При последовательном соединении элементов система отказывает при отказе одного элемента:

$$P_C(t) = \prod P_i(t).$$

Вероятность отказа первой части системы $Q_1(t)$ и вероятность безотказной работы $P_1(t)$:

$$Q_1(t) = Q^3(t) = (1 - e^{-\lambda t})^3,$$

$$P_1(t) = 1 - Q_1(t) = 1 - Q^3(t) = 1 - (1 - e^{-\lambda t})^3.$$

Вероятность отказа второй части системы $Q_2(t)$ и вероятность безотказной работы $P_2(t)$:

$$Q_2(t) = Q^2(t) = (1 - e^{-\lambda t})^2,$$

$$P_2(t) = 1 - Q_2(t) = 1 - Q^2(t) = 1 - (1 - e^{-\lambda t})^2.$$

Вероятность безотказной работы всей системы $P_C(t)$:

$$P_C(t) = P_1(t) \cdot P_2(t) = (1 - Q_1(t)) \cdot (1 - Q_2(t)) =$$

$$= (1 - Q^3(t)) \cdot (1 - Q^2(t)) = (1 - (1 - e^{-\lambda t})^3) \cdot (1 - (1 - e^{-\lambda t})^2).$$

и вероятность отказа $Q_C(t)$:

$$\begin{aligned} Q_C(t) &= 1 - P_C(t) = 1 - P_1(t) \cdot P_2(t) = 1 - (1 - Q_1(t)) \cdot (1 - Q_2(t)) = \\ &= 1 - (1 - Q^3(t)) \cdot (1 - Q^2(t)) = 1 - (1 - (1 - e^{-\lambda t})^3) \times \\ &\times (1 - (1 - e^{-\lambda t})^2). \end{aligned}$$

Так как время работы первой части T , а второй — T_C , то получаем:

$$Q_C(t) = 1 - (1 - (1 - e^{-\lambda T})^3) \cdot (1 - (1 - e^{-\lambda T_C})^2).$$

Таблица 8.1

Результаты аналитического расчета

T_c	$L = 0,10$	$L = 0,08$	$L = 0,07$	$L = 0,06$	$L = 0,05$	$L = 0,04$	$L = 0,03$	$L = 0,02$	$L = 0,01$
0,9	0,00826	0,00528	0,00404	0,00296	0,00205	0,00131	0,00074	0,00033	8E-05
0,8	0,00677	0,00430	0,00327	0,00239	0,00165	0,00105	0,00059	0,00026	6E-05
0,7	0,00543	0,00342	0,00259	0,00189	0,00130	0,00082	0,00046	0,00020	5E-05
0,6	0,00425	0,00265	0,00200	0,00145	0,00099	0,00062	0,00034	0,00015	4E-05
0,5	0,00324	0,00199	0,00149	0,00107	0,00073	0,00045	0,00025	0,00011	3E-05

Аналитический расчет для УВК, содержащего четыре ВМ

Вероятность безотказной работы системы равна:

$P_c(t)$ = (Вероятность безотказной работы 4-канальной системы на интервале $T_2 = T - T_c$) \times (Вероятность того, что ни один из 4-х блоков не отказал на интервале T_c) + (Вероятность безотказной работы 3-канальной системы на интервале $T_2 = T - T_c$) \times (Вероятность того, что 1 из 4-х блоков отказал на интервале T_c) + (Вероятность безотказной работы 2-канальной системы на интервале $T_2 = T - T_c$) \times (Вероятность того, что 2 из 4-блоков не отказали на интервале T_c).

$$P_c(T) = (P^4(T_2) + 4P^3(T_2)Q(T_2) + 6P^2(T_2)Q^2(T_2) + 4P(T_2)Q^3(T_2)) \times \\ \times P^4(T_c) + (P^3(T_2) + 3P^2(T_2)Q(T_2) + 3P(T_2)Q^2(T_2)) \times (4P^3(T_c)Q(T_c)) + \\ + (P^2(T_2) + 2P(T_2)Q(T_2)) \times (5P^2(T_c)Q^2(T_c))$$

Вероятность отказа $Q_c(t) = 1 - P_c(t)$.

Таблица 8.2

Результаты аналитического расчета

T_c	$L = 0,10$	$L = 0,08$	$L = 0,07$	$L = 0,06$	$L = 0,05$	$L = 0,04$	$L = 0,03$	$L = 0,02$	$L = 0,01$
0,9	0,00858	0,00545	0,00416	0,00304	0,00210	0,00134	0,00075	0,00033	8E-05
0,8	0,00676	0,00430	0,00328	0,00239	0,00165	0,00105	0,00059	0,00026	6E-05
0,7	0,00518	0,00328	0,00250	0,00183	0,00126	0,00080	0,00045	0,00020	5E-05
0,6	0,00381	0,00241	0,00184	0,00134	0,00093	0,00059	0,00033	0,00015	4E-05
0,5	0,00267	0,00168	0,00128	0,00093	0,00064	0,00041	0,00023	0,00010	3E-05

Результаты имитационного моделирования для $L = 0,1$, $L = 0,05$ и $L = 0,02$ и 1000000 циклов представлены на рис. 8.3–8.5.

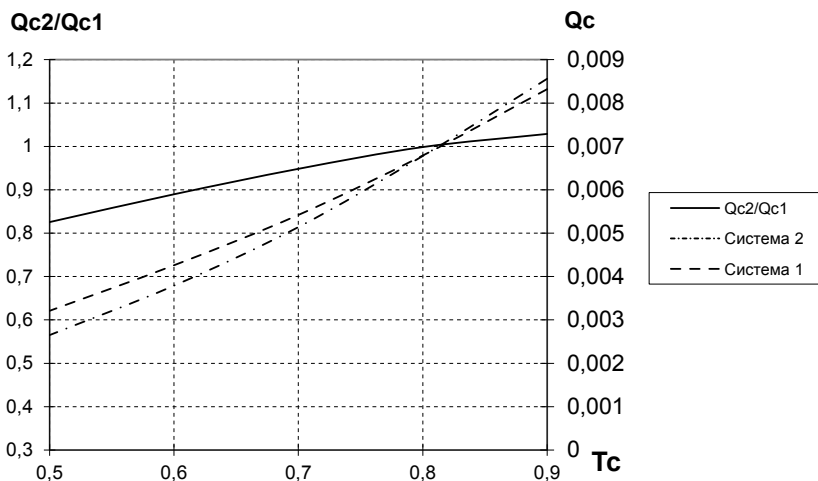


Рис. 8.3. Вероятность отказа УВК при $L = 0,1$

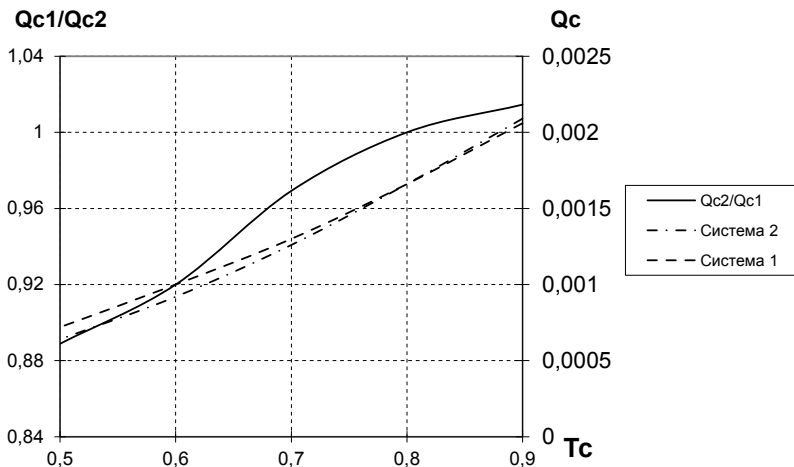


Рис. 8.4. Вероятность отказа УВК при $L = 0,05$

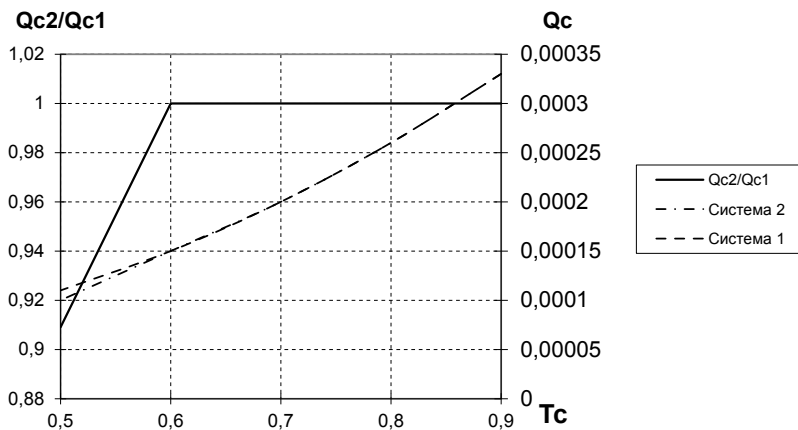


Рис. 8.5. Вероятность отказа БУВК при $L = 0,02$

При окончании работы ПСК в пределах $0,7 \div 0,9$ от общего времени работы вероятности отказа обоих вариантов УВК примерно равны. При уменьшении времени окончания ра-

боты ПСК (менее 0,7 от общего времени работы) вероятность отказа варианта УВК с четырьмя ВМ становится меньше. Соотношение вероятностей отказа не зависит от интенсивности отказа блоков. С точки зрения надежности использование варианта УВК с пятью вычислительными модулями преимуществ не имеет. Если учесть длительный этап хранения и необходимость снятия УВК для ремонта в случае возникновения отказа резервных модулей, то вариант с пятью вычислительными модулями существенно проигрывает, так как суммарная интенсивность отказов вычислителей на хранении по сравнению с четырехмодульным вариантом возрастает на 25 %. Необходимо учесть, что исключение пятого вычислителя сокращает объемно-массовые характеристики, энергопотребление и тепловыделение. При этом существенно сокращается стоимость аппаратуры и трудоемкость изготовления.

Проведенные исследования [14] показали, что решение по выбору варианта структуры резервирования через отношение вероятностей отказов вариантов устойчиво к изменению интенсивности отказов в реально возможных диапазонах ее значения.

Список библиографических ссылок

1. Основы теории систем управления высокоточных ракетных комплексов сухопутных войск / Б. Г. Гурский [и др.]. М., 2001. 328 с.
2. Апанасенко В. М., Рухадзе Р. А. Морские ракетно-ядерные системы вооружения. М. : ФГУП «Производственно-издательский комбинат ВИНТИ», 2003. 327 с.
3. Rutter C. Spaceraft anomalies and inture stends // IEE NS REC IEE Nuclear and space radiation conference short course: «Radiation Effects Challenges for 21st Centry Space Systems' July 15, 1996 Renaissance Esmeralda Result Indian Wells, California. 1996. P.I-1—I-52.
4. ГОСТ 25645.106—84. Пояса Земли радиационные, естественные. М., 1991.
5. ГОСТ 25645.150—90. Лучи космические, галактические. Модель изменения потоков частиц. М., 1991.
6. Тверской Б. А. Ускорение и замедление в межпланетной среде. М., 1971.
7. Barth J. Applying modeling space radiation environments // IEE Nuclear and Space Radiation Effects. Short Course. Applying Computer Conference Center. Snowmass Village. Colorado, 1997. P. 11—163.
8. ГОСТ 27.002—83. Надежность в технике. Термины и определения. М., 1983.
9. Надежность технических систем : справочник / под ред. И. А. Ушакова. М. : Радио и связь, 1985. 608 с.
10. Половко А. М., Гурова И. С. Основы теории надежности. СПб. : БХВ-Петербург, 2006. 704 с.

11. Антимиров В. М. Развитие архитектуры высоконадежных управляющих вычислительных комплексов // Сб. «Проектирование МЭА». М. : ЦНИИ «Электроника», 1988. Сер. 10; Микроэлектронные устройства. Вып. 2 (271).
12. Черкесов Г. Н. Надежность аппаратно-программных комплексов. СПб. : Питер, 2005.
13. Антимиров В. М. Организация распределения ресурсов в управляющих вычислительных комплексах // Сб. АН СССР «Проблемы управления движением и навигация». 1987. Вып. 22. С. 17–24.
14. Антимиров В. М., Ачкасов В. Н. Алгоритм сравнительной оценки надежности вариантов вычислительных комплексов для систем управления космических летательных аппаратов // Вестник Самарского аэрокосмического ун-та. Самара, 2005. № 17. С. 71–76.
15. Пономарев С. Л., Мищенко С. В., Белобратин В. Я. Управление качеством продукции. М. : РИА «Стандарты и качество», 2004. 248 с.
16. Антимиров В. М., Смелчакова Г. А. Инженерная методика исследования и выбора оптимального варианта архитектуры управляющей вычислительной системы в условиях неопределенности относительно интенсивности отказов // Естественные и технические науки. М. : Спутник+, 2014. № 4 (72). С. 125–132.
17. Кельтон В., Лоу А. Имитационное моделирование. Классика CS. 3-е изд. СПб. : Питер ; Киев : Издательская группа ВНУ, 2004. 847 с.

Оглавление

Введение	3
1. Классификация САУ и УВК	4
2. Задачи, решаемые при проектировании САУ	12
3. Структура САУ и архитектура БУВК.....	17
3.1. Структура САУ.....	17
3.2. Архитектура БУВК.....	17
4. Состав и характеристика факторов, дестабилизирующих работу САУ	21
4.1. Основные дестабилизирующие факторы.....	21
4.2. Дестабилизирующие факторы космического пространства	25
4.3. Радиационные пояса Земли	29
5. Факторы, влияющие на надежность подсистем САУ	32
5.1. Основные понятия теории надежности	32
5.2. Методы повышения надежности	36
6. Критерии оценки эффективности и надежности сложных систем.....	40
6.1. Критерии оценки эффективности и надежности БУВК как сложных систем	42
7. Принципы обеспечения и повышения надежности аппаратуры	51
8. Методы оценки надежности и выбора вариантов реализации в условиях неопределенности.....	77
Список библиографических ссылок	89

Учебное издание

Антимиров Владимир Михайлович

**ПРОЕКТИРОВАНИЕ АППАРАТУРЫ
СИСТЕМ АВТОМАТИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ
ДЛЯ РАБОТЫ В ЭКСТРЕМАЛЬНЫХ УСЛОВИЯХ**

В 2 частях

Часть 1

СОЗДАНИЕ САУ

**Редактор *Т. Е. Мериц*
Верстка *Е. В. Ровнушкиной***

Подписано в печать 05.10.2015. Формат 60×84 1/16.
Бумага писчая. Плоская печать. Усл. печ. л. 5,35.
Уч.-изд. л. 4,12. Тираж 100 экз. Заказ 342.

Издательство Уральского университета
Редакционно-издательский отдел ИПЦ УрФУ
620049, Екатеринбург, ул. С. Ковалевской, 5
Тел.: 8 (343) 375–48–25, 375–46–85, 374–19–41
E-mail: rio@urfu.ru

Отпечатано в Издательско-полиграфическом центре УрФУ
620075, Екатеринбург, ул. Тургенева, 4
Тел.: 8 (343) 350–56–64, 350–90–13
Факс: 8 (343) 358–93–06
E-mail: press-urfu@mail.ru



АНТИМИРОВ ВЛАДИМИР МИХАЙЛОВИЧ

Доктор технических наук, профессор кафедры «Автоматика» УрФУ, главный научный сотрудник АО «НПО автоматики».

Лауреат Государственной премии в области науки и техники за 2004 г. Автор 140 научных трудов, в том числе 2 монографий, а также 164 изобретений, в том числе 25 патентов.